

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені І.Сікорського»
Кафедра теоретичної та промислової теплотехніки**

В.М. Мінаковський, А.С. Соломаха

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА

ПРИКЛАДИ, ЗАДАЧІ, ТИПОВІ РОЗРАХУНКИ

ЧАСТИНА ПЕРША

За загальною редакцією В.М. Мінаковського

*Затверджено Вченою радою ТЕФ НТУУ «КПІ ім.І.Сікорського»
в якості навчального посібника*

Для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Кваліфікація 3113 Енергетик

Освітній ступінь – бакалавр

Київ, «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

2017

В.М.Мінаковський, А.С.Соломаха. Технічна термодинаміка. Приклади, задачі та типові розрахунки. Частина перша. За заг. ред. В.М.Мінаковського. Навчальний посібник. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 172 с.

*Гриф надано Вченою радою ТЕФ НТУУ «КПІ ім.І.Сікорського»
(Протокол № 11 від 26 червня 2017 р.)*

На в ч а л ь н е в и д а н н я

В.М.Мінаковський, А.С.Соломаха
ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА
ПРИКЛАДИ, ЗАДАЧІ, ТИПОВІ РОЗРАХУНКИ

ЧАСТИНА ПЕРША

За заг. ред. В.М.Мінаковського.
Навчальний посібник

Для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Кваліфікація 3113 Енергетик

Освітній ступінь – бакалавр

Відповідальний редактор: к.т.н., доцент М.Ф. Боженко

Рецензент: к.т.н., доцент каф. теплоенергетики та холодильної техніки НУХТ
С. М. Самійленко

© В.М.Мінаковський, А.С.Соломаха

ЗМІСТ

	Передмова.....	4
	Вступ.....	5
	Основні умовні позначення.....	9
1	Загальні методичні вказівки	10
	1.1. Підготовка до практичних занять та самоконтроль знань..	10
	1.2. Розв'язування задач і ведення записів.....	11
	1.3. Контроль знань.....	12
2	Приклади, задачі, типові розрахунки.....	13
	2.1. Параметри стану та їх обчислення.....	13
	2.2. Характеристики процесів та їх обчислення.....	21
	2.3. Перший закон термодинаміки.....	28
	2.4. Другий закон термодинаміки.....	36
	2.5. Властивості ідеальних газів і аналіз термодинамічних процесів ідеальних газів.....	48
	2.6. Властивості водяної пари і аналіз термодинамічних процесів водяної пари.....	63
	2.7. Властивості вологого повітря і аналіз термодинамічних процесів вологого повітря.....	85
	2.8. Термодинаміка потоку.....	124
	2.9. Термодинамічний аналіз процесів зміни стану робочих тіл (розрахункова робота).....	139
	Додатки.....	150
	Додаток 1. Довідково-інформаційні таблиці.....	150
	Додаток 2. Вихідні дані для варіантних розрахунків задач.....	158
	Додаток 3. Довідкові діаграми.....	167
	Література.....	171

ПЕРЕДМОВА

Посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» і вивчають нормативну дисципліну «Технічна термодинаміка» циклу професійної та практичної підготовки.

Мета посібника – поглиблення розуміння теоретичного матеріалу дисципліни, закріплення знань її основних положень, надання допомоги студентам в набутті практичних умінь і, по можливості, навичок виконання розрахунків за темами дисципліни. Посібник містить приклади розв’язування задач, умови задач для розв’язування на практичних заняттях і для самостійної домашньої роботи, завдання та приклади виконання типових розрахунків, необхідні методичні вказівки та довідковий матеріал. Умови багатьох задач і типових розрахунків містять багатоваріантні вихідні дані, що дозволяє, в деякій мірі, індивідуалізувати самостійну роботу студентів. Задачі з одноваріантними вихідними даними забезпечені відповідями. Для розв’язання задач передбачено використання розрахункових формул, які широко застосовуються в інженерних розрахунках з технічної термодинаміки і наведені у рекомендованих підручниках. Список рекомендованої літератури та літератури, з якої запозичені умови окремих завдань, наведено в кінці посібника. Для розв’язання деяких задач з вивчаємої теми необхідно використовувати результати розв’язання завдань попередніх тем, що вимагає від студентів систематичності самостійної роботи над дисципліною. Перед умовами прикладів і задач з кожної теми містяться вказівки про необхідні базові знання по темі для розв’язання задач, рекомендації з вивчення теоретичного матеріалу і питання для самоконтролю знань. У додатку 1 міститься довідковий матеріал, що є необхідним для розв’язання задач, але який не претендує на самостійну значимість.

Автори щиро вдячні рецензенту та відповідальному редактору за поради і критичні зауваження, які сприяли поліпшенню посібника, і будуть вдячні всім, хто висловить свої критичні зауваження, поради та побажання щодо його вдосконалення, заміні окремих завдань на методично більш вдалі.

*«При вивченні наук приклади не менш
повчальні, ніж правила»*

І. Ньютон

ВСТУП

Дисципліна «Технічна термодинаміка» є одним з найважливіших розділів теоретичних основ теплотехніки та слугує фундаментом багатьох дисциплін циклу професійно-практичної підготовки майбутніх фахівців в галузі теплоенергетики, теплофізики та енергетичного машинобудування.

Самостійна робота в формі розв'язання задач і виконання типових розрахунків при вивченні цієї дисципліни – важливий етап навчання, що допомагає краще усвідомити зміст теоретичного матеріалу, поглибити його розуміння, закріпити основні положення дисципліни, навчитися застосовувати їх самостійно при аналізі досить складних технічних проблем, дозволяє отримати практичні вміння виконувати розрахунки і оцінювати реальність одержаного кінцевого результату обчислень. У студентів необхідно виховувати повагу щодо прагнення неодмінно отримати вірні результати розрахунку.

Перш, ніж приступати до розв'язання задач з будь-якої теми, необхідно вивчити відповідний рекомендований теоретичний матеріал і переконатися в розумінні та засвоєнні основних понять та ідей, відповівши на питання для самоконтролю знань.

Слід чітко уявляти область практичного застосування: розрахункових формул (особливо тих, які отримані з використанням обмежувальних припущень та спрощень); методів розрахунків та точність, що ними забезпечується.

Приступаючи до самостійного розв'язання завдань, необхідно попередньо розібратися з наведеними прикладами розв'язання задач по темі, що вивчається, а потім виконувати самостійно запропоновані завдання.

Розв'язуючи задачі, доцільно дотримуватися такої послідовності дій. Розібратися з усіма термінами, формулюваннями, схемами, рисунками, що зустрічаються в умові завдання; усвідомити умову задачі, аби чітко уявити, що задано, а що потрібно визначити, мету завдання в цілому. Розумінню умови допомагає його скорочений запис в буквено-числовому вигляді. При цьому слід дотримуватися прийнятих при викладанні дисципліни літерних позначень величин та звертати увагу на одиниці величин, особливо коли це не одиниці СІ.

Потім слід сформулювати ідею розв'язання. Цьому істотно допомагає принципово правильне, акуратне зображення пояснювальних рисунків, на-

приклад, процесів зміни стану вологого повітря в h, d - діаграмі, вигляду і взаємного розташування ліній цієї діаграми, а також p, v -, T, s -, h, s - діаграм.

Грунтуючись на ідеї розв'язання, необхідно скласти план її реалізації – план розв'язування задачі. Для цього потрібно виписати співвідношення, що зв'язують шукані величини з іншими величинами, як заданими за умовою, так і не заданими, а також ці останні зв'язують з заданими за умовою. Іноді такі співвідношення доводиться виводити самостійно. В цьому випадку викладки повинні бути приведені повністю, а в кінцевій формулі перевірені розмірності її лівої та правої частин, що дозволяє виявити помилки, допущені в ході викладок.

Маючи розрахункові співвідношення, необхідно визначити послідовність їх використання. План рішення вважається складеним, якщо відомо за якими розрахунковими співвідношеннями, в якій послідовності і за якою технологією їх використання можна визначити шукані величини на підставі заданих за умовою.

Виробляючи ідею розв'язання, доцільно проаналізувати, чи не містить умова задачі інформацію, яка дозволяє реалізувати більш, ніж одну ідею. Це відноситься і до плану реалізації ідеї.

Наступний етап – реалізація плану. Його починають з підготовки необхідних довідкових даних, що не наведені в умові завдання. Посилання на джерело довідкових даних при цьому обов'язкове.

Перш ніж проводити обчислення, всі вихідні дані мають бути представлені в одиницях СІ. Виняток становлять величини, що входять в емпіричні формули в одиницях, зазначених у примітках до таких формул. Потім необхідно підставити в розрахункові співвідношення числові значення величин в необхідних одиницях в суворій відповідності з місцем розташування позначень цих величин, перевірити правильність підстановки і використання одиниць величин. Необхідно стежити за тим, щоб позначення величин і їх значення в тексті умови, на пояснювальних рисунках і в формулах збігалися.

Перевірки на цій стадії і протягом усього ходу обчислень багато в чому визначають правильний результат відповіді до задачі.

Результат обчислень слід записувати із зазначенням одиниць величин і з точністю, що узгоджена з точністю вихідних даних відповідно до правил наближених обчислень, пам'ятаючи, що результат розрахунку не може бути точніше вихідних даних.

Слід привчити себе відразу ж після отримання результату аналізувати його з точки зору реальності обчисленого значення величини, відповідності його достовірним, надійним практичним або розрахунковими даним, що отримані для ідентичних або подібних умов, і тільки після цього порівнювати

результат з відповіддю в задачнику. Наявність відповідей до задач може спровокувати студента записати цю відповідь, не отримавши її реально в результаті власного розрахунку. Це необхідно враховувати викладачу при перевірці виконання студентами домашніх завдань. Студентам бажано аналізувати зміну результату рішення задачі при зростанні або зменшенні значень величин у вихідних даних. В кінці задач необхідно записувати відповідь або висновки щодо результатів.

Виконання цих рекомендацій дозволяє уникнути багатьох помилок при самостійній роботі, виключити непродуктивну витрату часу і підвищити ефективність роботи.

Ступінь самостійності розв'язання задач, виконання типових розрахунків, кількість отриманих при цьому правильних результатів дозволяють студенту оцінити як міцність засвоєння знань теоретичного матеріалу, так і набуті вміння та навички практичного використання цих знань.

Посібник використовується переважно при проведенні практичних занять і виконанні домашніх завдань студентами. Тому звертаємо увагу на ведення робочих зошитів, які є основним звітним документом при виконанні завдань відповідного розділу робочої програми дисципліни.

Кожен студент зобов'язаний мати зошит для запису матеріалу практичних занять в аудиторії і виконаних ним домашніх завдань. Записи в зошиті повинні бути розбірливими, чіткими, акуратними. Обов'язково повинні бути поля, вказана дата, вид (аудиторне або домашнє), порядковий номер, тема заняття. Слід виділити в кінці зошита дві-три сторінки для запису співвідношень, що часто зустрічаються (зокрема співвідношень між одиницями величин в різних системах і одиницями СИ), формул, довідкових даних і т.п. Для аудиторних занять вказується також перелік розглянутих питань по темі, наводяться методичні вказівки викладача і далі – завдання з рішеннями. При оформленні домашніх завдань спочатку записують завдання та їх розв'язування, а потім відповіді на питання для самоконтролю знань з теми майбутнього заняття.

При розв'язуванні завдань вказують їх порядковий номер, а умови записують в скороченому буквено-числовому вигляді або повністю, якщо завдання запропоновано викладачем не з цього посібника.

Зміст, обсяг і послідовність проведення кожного практичного заняття визначаються робочою навчальною програмою дисципліни і конкретними особливостями навчального семестру.

Виконання типового розрахунку сприяє розвитку у студентів умінь самостійно вирішувати інженерні завдання, літературно і технічно грамотно викладати пояснювальну записку, дотримуючись вимог стандартів ЄСКД до

її оформлення, обґрунтовувати і захищати прийняті рішення та отримані результати розрахунків. Кожен студент виконує типовий розрахунок відповідно до завдання за варіантом, що визначається викладачем.

Типовий розрахунок оформляється у вигляді розрахунково-пояснювальної записки відповідно до вимог ДСТУ 2.105-95, супроводжується необхідними рисунками та списком використаної літератури, на яку мають бути посилання в тексті. Розуміння записки повинно бути можливим без роз'яснень її автора.

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

B – барометричний тиск;	n – показник політропи; коефіцієнт рециркуляції;
E – ексергія;	p – тиск;
H – ентальпія, висота;	q – кількість теплоти питома;
L – термодинамічна робота;	r – об’ємна частка, питома теплота пароутворення;
N – потужність, роботоздатність;	s – питома ентропія;
Q – кількість теплоти;	t – температура;
R – газова стала;	u – питома внутрішня енергія;
S – ентропія;	v – питомий об’єм;
T – температура абсолютна (термодинамічна);	w – швидкість потоку;
U – внутрішня енергія;	x – вологовміст; ступінь (міра) сухості пари;
V – об’єм;	Δ – різниця значень величин;
W – кількість вологи;	Ψ – ступінь насиченості повітря;
Z – висота над поверхнею;	α – коефіцієнт; кут;
a – місцева швидкість звуку в потоці;	δ – символ нескінченно малого значення величини;
c – питома теплоємність;	ε – потенціал сушіння; холодильний коефіцієнт;
d – вологовміст; символ операції диференціювання;	η – коефіцієнт корисної дії;
e – питома ексергія;	μ – молекулярна маса;
f – площа перерізу;	ρ – густина;
h – питома ентальпія; висота;	τ – час;
k – показник адіабати;	ϕ – відносна вологість повітря; опалювальний коефіцієнт.
l – питома термодинамічна робота; довжина;	
m – маса; масова витрата;	

Основні індекси

p – ртуть; наявна (робота);	$нс$ – навколишнє середовище;
$в$ – вода; вакуум;	$рт$ – робоче тіло;
$к$ – кінетична; відноситься до компресора;	$тр$ – тертя;
$п$ – прошовхування (робота); парціальне значення;	$хд$ – холодне джерело;
$ц$ – відноситься до циклу;	$пов$ – повітря;
$т$ – середнє значення величини;	$тех$ – технічна (робота);
$гд$ – гаряче джерело;	$відв$ – відведення;
$ел$ – електрична;	$надл$ – надлишкове значення;
	$підв$ – підведення;
	$сист$ – система.

I. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

1.1. Підготовка до практичних занять і самоконтроль знань

Студент повинен готуватися до кожного заняття систематично, не пропускаючи жодної з тем і виконуючи всі домашні завдання. При цьому доцільно використовувати таку послідовність дій.

Перш за все, потрібно переглянути в зошиті для практичних занять матеріал по темі попереднього аудиторного заняття, звернувши особливу увагу на методичні вказівки викладача. Переконавшись в тому, що по цій темі все зрозуміло. Потім слід вирішувати завдання, рекомендовані в якості домашнього завдання по темі цього заняття. Якщо при виконанні домашнього завдання виникають питання, відповісти на які самостійно студент не може, він обов'язково повинен звернутися за консультацією до викладача напередодні майбутнього практичного заняття, так як під час практичного заняття при перевірці домашнього завдання обговорюються лише питання про раціональність та оригінальність використаних методів розв'язання, про типові помилки в рішеннях.

Ступінь самостійності розв'язання завдань і правильність отриманих результатів дозволяє студенту оцінити свої знання з теми, що вивчається, і набути умінь та певного досвіду практичного використання цих знань.

Вирішивши задачу, слід приступати до вивчення матеріалу по темі наступного практичного заняття. Спочатку необхідно ознайомитися з метою заняття, з об'ємом базових знань і з методичними вказівками по темі. Потім потрібно прочитати по конспекту і рекомендованій літературі матеріал по темі заняття. При першому читанні треба усвідомити і засвоїти основні поняття та ідеї, зрозуміти фізичну сутність описаних явищ і процесів, не зупиняючись на виводі окремих аналітичних залежностей.

Далі слід перейти до детального вивчення матеріалу: запам'ятати формулювання визначень і законів; розібратися з зображеннями в термодинамічних діаграмах процесів зміни стану робочого тіла; в математичних викладах, звертаючи увагу на фізичний зміст, як висновків, так і отриманих з їх допомогою результатів. Дуже важливо чітко уявляти собі область практичного використання розрахункових формул, особливо в тих випадках, коли отримання аналітичних залежностей обмежено певними припущеннями або спрощеннями; знати, в яких випадках можна використовувати той чи інший метод або розрахункову формулу, яка при цьому буде точність розрахунку. Для кращого запам'ятовування матеріалу слід самостійно, не використовуючи конспект або книги, провести відповідні аналітичні викладки.

Освоївши теоретичний матеріал, необхідно дати письмові відповіді на питання для самоконтролю знань з теми. Відповіді повинні бути вичерпними і, по можливості, короткими.

На закінчення необхідно ознайомитися з наведеними прикладами по темі майбутнього заняття і проаналізувати хід їх розв'язання.

Доцільно ознайомитися з умовами задач, які необхідно буде розв'язувати в аудиторії під час наступного заняття, і спробувати зрозуміти ідею рішення.

1.2. Розв'язування задач і ведення записів

Кожен студент зобов'язаний мати зошит для запису матеріалу практичних занять в аудиторії і домашніх завдань. Доцільно також мати зошит-чернетку. Записи в зошиті повинні бути розбірливими, чіткими, акуратними. Обов'язково повинні бути поля, вказані дата, вид (аудиторне або домашнє), порядковий номер заняття. Слід виділити в кінці зошита дві-три сторінки для запису співвідношень між одиницями фізичних величин, що використовуються в різних системах і одиницями СІ, розрахункових формул, довідкових даних і т.п. Для аудиторних занять вказується тема, перелік питань, що розглядаються по темі, наводяться методичні вказівки викладача і далі – завдання з розв'язками. При оформленні домашніх завдань спочатку записують задачі з розв'язками, а потім відповіді на питання для самоконтролю знань з теми наступного заняття.

При розв'язанні задач вказують їх порядковий номер. Якщо це задачі не з цього посібника, то їх умови записують повністю. Приступаючи до розв'язання задачі, перш за все, необхідно усвідомити її умову та чітко уявляти, що задано, а що потрібно визначити. Цьому допомагає скорочений запис умови в буквено-числовому вигляді. Слід використовувати буквені позначення величин, прийняті для даної дисципліни, а числові значення величин наводити в одиницях СІ. Студент повинен розуміти всі терміни, рисунки, схеми, словесні формулювання, що зустрічаються в тексті, і зміст завдання в цілому.

Наступний крок – формулювання ідеї розв'язування задачі. Як зазначено вище, цьому допомагають пояснювальні рисунки і схеми, зображуючи які, потрібно звертати особливу увагу на правильність їх виконання.

Далі складають план розв'язання задачі. Для цього виписують відомі з лекційного матеріалу співвідношення для визначення шуканих величин через інші величини, які задані за умовою, та величини з довідкових даних. Виписавши співвідношення між усіма величинами, необхідними для визначення

шуканих величин і заданими за умовою, проводять викладки, які дозволяють отримати розрахункові формули для обчислення шуканих величин безпосередньо через величини, задані за умовою, та намітити математичну послідовність розрахунку. Обов'язково перевірити розмірності величин у формулах, отриманих в результаті математичних викладок. План рішення вважається складеним, якщо відомо, за якими розрахунковими формулами і в якій послідовності їх використання можна обчислити шукані величини на підставі заданих за умовою.

Наступний крок – реалізація плану розв'язання задачі. Необхідно виписати всі довідкові дані, які не наведені в тексті умови задачі. Потім підставити числові значення величин в одиницях СІ в розрахункові співвідношення, так як це було зазначено у вступі і перевірити правильність підстановки і одиниць величин. Перевірка на цій стадії обчислень великою мірою визначає правильний результат усього рішення задачі. Точність подання кінцевих результатів не повинна перевищувати точності вихідних даних. Результат обчислень записують із зазначенням одиниць величин. Рішення повинно супроводжуватися короткими поясненнями.

Відразу ж після отримання результату він має бути проаналізованим з точки зору реальності числового значення, відповідності його відомим аналогічним практичним або розрахунковим даним. Потім слід порівняти його з відповіддю, яка наведена в посібнику. Після розв'язання результат або висновки обов'язково записують.

Кожен студент, приходячи на практичні заняття, зобов'язаний мати засоби розрахунку (калькулятор).

1.3. Контроль знань

Формами об'єктивного і систематичного контролю рівня засвоєння студентами навчально-програмного матеріалу, якості знань, умінь і навичок під час проведення практичних занять є: перевірка виконання домашніх завдань; опитування по темі практичного заняття; індивідуалізація умов ряду типових задач, що забезпечує особисту і активну участь кожного студента у вирішенні поставленого завдання; опитування, які дозволяють визначити глибину розуміння студентами фізичної сутності розглянутих завдань; контрольні роботи.

Кожне заняття починається з контролю виконання домашнього завдання по матеріалу попередньої теми та базових знань по темі поточного заняття. На заняттях бажано використовувати метод активного самостійного розв'язання задач кожним студентом, що забезпечується вивченням відпові-

дних прикладів і достатньою кількістю задач та варіантів числових даних до умов деяких задач. Ідею і план розв'язання кожного завдання студенти продумують і обговорюють з викладачем з метою прийняття остаточного рішення. Викладач контролює роботу студентів, в необхідних випадках дає вказівки або розв'язує окремі фрагменти завдання на дошці.

2. ПРИКЛАДИ, ЗАДАЧІ, ТИПОВІ РОЗРАХУНКИ

2.1. ПАРАМЕТРИ СТАНУ ТА ЇХ ОБЧИСЛЕННЯ

Мета – поглибити знання про термодинамічні параметри стану та їх властивості, сформулювати вміння обчислювати параметри стану робочих тіл та систем.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Необхідно: мати поняття про систему одиниць фізико-технічних величин; знати які системи одиниць використовують в теплотехніці, як побудована міжнародна система одиниць (СІ), одиниці механічних і тепло-вих величин в СІ та різних системах і взаємозв'язок цих одиниць; визначення термічних і калоричних параметрів стану робочих тіл і фізичну сутність кожного параметра; визначальні та розрахункові формули для обчислення параметрів, математичні властивості параметрів стану.

Рекомендована література: [1.1], [1.2], [1.4].

Рекомендації з вивчення матеріалу по темі

Одиницями фізичних величин, обов'язковими до використання, слугують одиниці СІ. Слід вивчити одиниці механічних і теплових величин в СІ, які системи одиниць використовують в теплотехнічній практиці, як вони пов'язані між собою, а також одиниці механічних і теплових величин, які використовують в цих системах одиниць.

Вивчити та усвідомити поняття: «термодинамічна система», «робоче тіло», «термодинамічний стан системи», «параметр стану системи», «рівноважний стан системи». Вивчити загальну характеристику параметрів стану, їх класифікацію, окремі параметри стану, розібравшись з фізичною суттю кожного з них. Вивчаючи параметр «тиск», звернути увагу на те, які види тисків розрізняють, який зв'язок між ними, який тиск служить параметром стану, як і в яких одиницях вимірюють тиск, який взаємозв'язок між цими одиницями.

Вивчаючи параметр «температура», розібратися з принципом, на якому базується вимірювання температури об'єктів, з принципами дії різних вимірювачів температури, з поняттям «температурна шкала» і класифікацією цих шкал. Звернути увагу на те, яка температура є параметром стану, в яких одиницях вона вимірюється, як пов'язана з температурами, що вимірюються в різних температурних шкалах.

Необхідно знати, в яких випадках в якості параметра стану можна використовувати не тільки об'єм, але і питомий об'єм (густину) робочого тіла, як можна обчислити питомий об'єм (густину) газоподібного робочого тіла за «нормальних умов», що таке «нормальний метр кубічний $[m_n^3]$ » робочого тіла.

Вивчаючи термічні параметри стану, доцільно, крім підручників, скористатися довідником [2.7], в якому міститься докладна характеристика параметрів p , T , v .

Фізична сутність калоричних параметрів більш детально розкривається при вивченні Першого і Другого законів термодинаміки. Необхідно вивчити визначення цих величин, визначальні і розрахункові формули для їх обчислення, одиниці величин. Звернути увагу на те, що в термодинаміці цікавляться, як правило, зміною значень калоричних параметрів при переході робочого тіла (системи) з одного стану в інший, а не абсолютними значеннями цих параметрів.

Засвоїти поняття «рівноважний і нерівноважний стани системи», взаємозв'язок між параметрами стану в рівноважних станах, його аналітичну (у вигляді рівняння стану) і графічну інтерпретації.

На закінчення слід вивчити математичні властивості параметрів стану.

Питання для самоконтролю знань

1. Що таке одиниця фізичної величини?
2. Як встановлюють одиниці і їх розмір?
3. Що таке система одиниць фізичних величин?
4. Охарактеризуйте коротко СІ.
5. Які одиниці величин допускають до застосування нарівні з одиницями СІ в термодинаміці?
6. Поясніть відмінність понять маси тіла і кількості речовини. Одиниці цих величин в СІ.
7. Дайте визначення понять «термодинамічна система», «робоче тіло», «термодинамічний стан системи (робочого тіла)».

8. Що таке «параметр стану»? Які параметри стану вважають в термодинаміці основними і чому, як їх класифікують, чи є вони незалежними?
9. Які параметри визначають тепловий стан системи і в яких одиницях СІ вони використовуються? Перелічіть відомі Вам термічні та калоричні параметри стану.
10. Які види тисків розрізняють при вимірюваннях і в яких одиницях вимірюють тиск на практиці? Який зв'язок між цими одиницями? Які одиниці тиску використовують в Англії та США?
11. Що таке температура, температурна шкала і які температурні шкали використовують на практиці? Які співвідношення між температурами за цими шкалами?
12. Що таке внутрішня енергія системи (робочого тіла)?
13. Що таке ентальпія системи (робочого тіла)?
14. Що таке рівняння стану системи (робочого тіла)? Його графічна інтерпретація.
15. Які математичні властивості є у параметрів стану?
16. Що таке нормальні фізичні умови?

Приклади

Приклад 1.1. Манометр, встановлений на ресивері із стиснутим повітрям, яке подається від компресора, показує тиск повітря, що дорівнює 1,5 МПа. Барометричний тиск дорівнює 740 мм рт.ст. Визначити абсолютний тиск повітря в ресивері. Відповідь надати в мегапаскалях (МПа), барах (бар) і в кілограмах на квадратний сантиметр (кГ/см²).

Розв'язання. Запишемо умови прикладу в скороченому буквено-числовому вигляді згідно з рекомендаціями, наведеними в пункті 1.2.

$p_{\text{надл}} = 1,5 \text{ МПа}$ $B = 740 \text{ мм рт.ст.}$ $p = ?$	Виразимо величини, задані за умовою, в одиницях СІ: $p_{\text{надл}} = 1,5 \text{ МПа} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,5 \cdot 10^6 \cdot 1,02 \cdot 10^{-5} =$ $= 15,3 \text{ кГ/см}^2 = 15,3 \cdot 0,981 \text{ бар} = 15 \text{ бар.}$
-------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$B = 740 \text{ мм рт. ст.} = 740 \cdot 133 \cdot 10^{-6} \text{ МПа} = 0,98 \text{ МПа} = 740 \cdot 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ кГ/см}^2 =$$

$$= 1,006 \text{ кГ/см}^2 = 740 \cdot 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ бар} = 0,984 \text{ бар.}$$

За визначенням $p = B + p_{\text{надл}}$, тоді $p = 0,98 + 1,5 = 1,598 \text{ МПа} = 0,984 +$
 $+ 15 = 15,984 \text{ бар} = 1,006 + 15,3 = 16,306 \text{ кГ/см}^2$.

Відповідь: $p \cong 1,6 \text{ МПа} = 16 \text{ бар} = 16,3 \text{ кГ/см}^2$.

Приклад 1.2. Визначити густину повітря та водню за нормальних умов, вважаючи їх ідеальними газами.

Розв'язання. За визначенням $\rho = 1/v$, де $v = V/m = V_\mu/\mu$, де μ – відносна молекулярна маса газу, кг/кмоль; V_μ – об'єм одного кіломоля газу, м³/кмоль. Тоді $\rho = m/V = \mu/V_\mu$. Відомо, що за нормальних умов ($p = 760$ мм.рт.ст., $t = 0$ °C) для будь-якого ідеального газу $V_\mu^\circ = 22,4$ м³/кмоль. З табл. П.1.3 додатків для повітря $\mu_{\text{нов}} = 28,97$ кг/кмоль, для водню $\mu_{\text{H}_2} = 2,016$ кг/кмоль. Тоді $\rho_{\text{нов}}^\circ = \mu_{\text{нов}}/V_\mu^\circ$ і $\rho_{\text{H}_2}^\circ = \mu_{\text{H}_2}/V_\mu^\circ$; $\rho_{\text{нов}}^\circ = 22,97/22,4 \approx 1,293$ кг/м³; $\rho_{\text{H}_2}^\circ = 2,016/22,4 \approx 0,0899$ кг/м³.

Відповідь: $\rho_{\text{нов}}^\circ = 1,293$ кг/м³; $\rho_{\text{H}_2}^\circ = 0,0899$ кг/м³.

Приклад 1.3. У скільки разів зміниться тиск пари, що проходить через турбіну, якщо перед турбіною надлишковий тиск дорівнює 89,5 ат, а вакуум після турбіни в конденсаторі дорівнює 720 мм рт.ст.? Барометричний тиск дорівнює 1010 млбар.

Розв'язання. Виразимо величини, задані за умовою, в одиницях СІ: $p_{\text{надл}} = 89,5$ ат = $89,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4$ Па; $p_{\text{в}} = 720$ мм рт.ст. = $(720/750) \cdot 10^5 = 0,96 \cdot 10^5$ Па; $B = 1010$ млбар = 1,01 бар = $1,01 \cdot 10^5$ Па.

Нехай абсолютний тиск пари перед турбіною дорівнює p_1 і після турбіни p_2 . З визначення абсолютного тиску $p_1 = B + p_{\text{надл}}$ і $p_2 = B - p_{\text{в}}$. Звідси витікає: $p_1 / p_2 = (B + p_{\text{надл}}) / (B - p_{\text{в}})$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $p_1 / p_2 = (1,01 \cdot 10^5 + 89,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4) / (1,01 \cdot 10^5 - 0,96 \cdot 10^5) \approx 1774$.

Відповідь: тиск зміниться у 1774 рази.

Приклад 1.4. Визначити, чи однакові стани робочого тіла, які характеризуються наступними значеннями параметрів: $p_1 = 1,5$ бар; $\rho_1 = 0,75$ кг/м³; $p_2 = 1125$ мм рт.ст.; $V_2 = 6$ м³; $m_2 = 4,5$ кг ?

Розв'язання. Виразимо величини, задані за умовою, в одиницях СІ: $p_1 = 1,5$ бар = $1,5 \cdot 10^5$ Па; $p_2 = 1125$ мм рт.ст. = $(1125/750) \cdot 10^5 = 1,5 \cdot 10^5$ Па.

Стани робочого тіла будуть однаковими, якщо при $p_1 = p_2$ густини $\rho_1 = \rho_2$. Тоді $\rho_2 = m_2 / V_2 = 4,5 / 6 = 0,75$ кг/м³, а оскільки $\rho_1 = 0,75$ кг/м³, то стани однакові.

Відповідь: стани однакові.


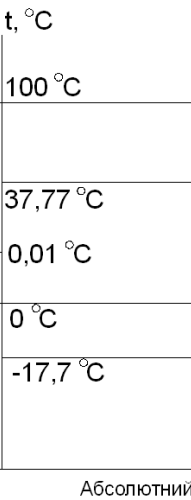
Приклад 1.5. Зв'язок між міжнародною практичною температурною шкалою (МПТШ) в градусах Цельсія* і Кельвінах та шкалою Фаренгейта** показана у вигляді схеми на рис.1.1. Вивести формули для взаємного перерахунку показань термометрів з цими шкалами.

*Андерс Цельсій (1701 – 1744 р.р.) – шведський фізик.

**Габріель Фаренгейт (1686 – 1736 р.р.) – німецький фізик.

Розв’язання. З рис.1.1 видно, що на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ припадає $(212 - 32) = 180\text{ }^{\circ}\text{F}$, або на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ припадає $1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$. Таким чином, $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1,8\text{ }^{\circ}\text{F} = 9/5\text{ }^{\circ}\text{F}$. Оскільки, $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$, то і $1\text{ K} = (9/5)\text{ }^{\circ}\text{F}$. Якщо відома температура в градусах Цельсія, то $t\text{ }^{\circ}\text{F} = (9/5)t\text{ }^{\circ}\text{C} + 32$. Якщо відома температура в градусах Фаренгейта, то $t\text{ }^{\circ}\text{C} = (5/9)(t\text{ }^{\circ}\text{F} - 32)$. Оскільки, $T\text{ K} = t\text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15$, то $T\text{ K} = 5/9(t\text{ }^{\circ}\text{F} - 32) + 273,15$ і $t\text{ }^{\circ}\text{F} = 9/5(T\text{ K} - 273,15) + 32$.

Відповідь: $T\text{ K} = 5/9(t\text{ }^{\circ}\text{F} - 32) + 273,15$; $t\text{ }^{\circ}\text{F} = 9/5(T\text{ K} - 273,15) + 32$.

T, K	t, °C	t, °F	t, °Ra
373,15 K	100 °C	212 °F	671,67 °Ra
$T\text{ K} = t\text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15$ 	37,77 °C	100 °F	491,67 °Ra
	0,01 °C	32 °F	
	0 °C	0 °F	0 °Ra
	-17,7 °C	-459,67 °F	

Абсолютний нуль температури

Рис.1.1. До прикладу 1.5 і задач 1.6, 1.7, 1.13, 1.14

Приклад 1.6. В ємності об’ємом 1 м^3 міститься 120 кг водяної пари. Тиск за манометром становить $8,4\text{ МПа}$. Визначити внутрішню енергію пари, якщо відомо, що її ентальпія* $h = 433,96\text{ ккал/кг}$, а барометричний тиск $B = 750\text{ мм рт.ст.}$

Розв’язання. Виразимо величини, задані за умовою, в одиницях СІ: $p_{\text{надл}} = 8,4\text{ МПа} = 8,4 \cdot 10^6\text{ Па}$; $B = 750\text{ мм рт.ст.} = 10^5\text{ Па}$; $h = 433,96\text{ ккал/кг} = 433,96 \cdot 4,19 = 1817\text{ кДж/кг}$.

Згідно з визначенням $h = u + pv$, звідки $u = h - pv$, де $v = V/m$, $\text{м}^3/\text{кг}$. Абсолютний тиск $p = p_{\text{надл}} + B$ і, відповідно, $u = h - (p_{\text{надл}} + B) V/m$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $p_{\text{надл}} = 8,4 \cdot 10^6 + 0,1 \cdot 10^6 = 8,5 \cdot 10^6\text{ Па}$; $u = 1817 - 8,5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}/120 \approx 1746\text{ кДж/кг}$.

Відповідь: $u \approx 1746\text{ кДж/кг}$.

Приклад 1.7. Як зміниться ентальпія 1 кг повітря, якщо при постійному тиску $p = 1\text{ ат}$ об’єм повітря збільшився в 2 рази, а його внутрішня енергія збільшилася в 3 рази? Прийняти, що $v_1 = 0,77\text{ м}^3/\text{кг}$, $u_1 = 15\text{ кДж/кг}$.

* Термін введено Камерлінг-Оннесом [3.2]

Розв'язання. Виразимо величини, задані за умовою, в одиницях СІ: $p = 1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$. За визначенням $h = u + pv$. Звідси витікає, що $h_1 = u_1 + pv_1$, $h_2 = u_2 + pv_2 = 3u_1 + p2v_1$. Тоді $h_2 / h_1 = (3u_1 + p2v_1) / (u_1 + pv_1) = 2 + u_1 / (u_1 + pv_1)$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $h_2 / h_1 = 2 + 15 \cdot 10^3 / (15 \cdot 10^3 + 9,81 \cdot 10^4 \cdot 0,77) \approx 2,17$.

Відповідь: ентальпія збільшиться в 2,17 рази.

Приклад 1.8. Визначити зміну внутрішньої енергії пари, питомий об'єм якої збільшився від $v_1 = 5,32 \text{ м}^3/\text{кг}$ до $v_2 = 8,39 \text{ м}^3/\text{кг}$ при незмінному тиску, який за вакууметром дорівнює 48,5 см рт.ст. Ентальпія пари при цьому збільшилася від $h_1 = 678 \text{ ккал/кг}$ до $h_2 = 803 \text{ ккал/кг}$. Барометричний тиск $B = 780 \text{ мм рт. ст.}$

Розв'язання. Виразимо величини, задані за умовою, в одиницях СІ: $h_1 = 678 \cdot 4,19 \approx 2838 \text{ кДж/кг}$; $h_2 = 803 \cdot 4,19 \approx 3362 \text{ кДж/кг}$; $p_v = 485(10^5/750) = 0,6466 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $B = 780 \cdot 10^5/750 = 1,04 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Зміна внутрішньої енергії $\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1)$. За визначенням $p = B - p_v$. Тоді $\Delta u = h_2 - h_1 - (B - p_v)(v_2 - v_1) = 3362 - 2838 - (1,04 - 0,6466) \cdot 10^5 (8,39 - 5,32) \cdot 10^{-3} \approx 402,9 \text{ кДж/кг}$.

Відповідь: $\Delta u = 402,9 \text{ кДж/кг}$.

Задачі

Задача 1.1. Для вимірювання малих надлишкових тисків або малих розріджень використовують мікроманометри. Визначити абсолютний тиск у повітроводі, якщо довжина l стовпа рідини в трубці мікроманометра, яка нахилена під кутом $\alpha = 30^\circ$, дорівнює 180 мм. Робоча рідина – спирт з густиною $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$. Покази барометра $B = 1,020 \text{ бар}$. Тиск виразити в барах, міліметрах ртутного стовпчика, мегапаскалях і кілограмах на квадратний сантиметр. Схема мікроманометра зображена на рис.1.2.

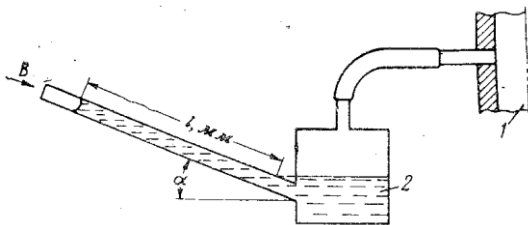


Рис.1.2. До задачі 1.1.

1 - повітровід;

2 - мікроманометр, що заповнений спиртом.

Відповідь: $p = 1,027 \text{ бар} = 0,103 \text{ МПа} = 770 \text{ мм рт.ст.} = 1,047 \text{ кг/см}^2$.

Задача 1.2. Розрахувати густину за нормальних умов аргону, гелію, кисню, окису вуглецю.

Відповідь: $\rho_0 = 1,783 \text{ кг/м}^3$; $0,179 \text{ кг/м}^3$; $1,429 \text{ кг/м}^3$; $1,250 \text{ кг/м}^3$.

Задача 1.3. Цистерна вміщує $2 \cdot 10^3$ кг води при температурі 20°C . Чи поміститься в цій цистерні $2,5 \text{ м}^3$ бензину.

Відповідь: ні.

Задача 1.4. Висота рівня рідинного палива в баку автомобіля на 70 см вища рівня вхідного отвору паливного фільтра бензонасосу. Визначити, під яким тиском надходить паливо в фільтр, якщо його густина 860 кг/м^3 , а барометричний тиск 750 мм рт.ст.

Відповідь: $p = 0,106 \text{ МПа}$.

Задача 1.5. В U-подібному манометрі (рис.1.3.), який заповнений ртуттю, над рівнем ртуті наливають шар води, який запобігає випаровуванню ртуті. Визначити абсолютний тиск в повітроводі, до якого підключений такий манометр, якщо висота стовпа ртуті $H_p = 630 \text{ мм рт.ст.}$, а висота шару води над ртуттю $h_{e1} = 75 \text{ мм}$ і $h_{e2} = 90 \text{ мм}$. Барометричний тиск

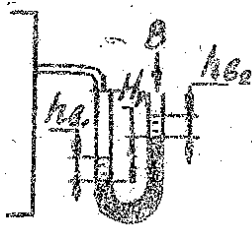


Рис.1.3. До задачі 1.5. 735 мм рт.ст.

Відповідь: $p = 0,182 \text{ МПа}$.

Задача 1.6. Яка температура абсолютного нуля, трійчастої точки та кипіння води при нормальному ($B = 760 \text{ мм рт.ст.}$) тиску за шкалою Фаренгейта?

Відповідь: $-459,67^\circ\text{F}$; $32,018^\circ\text{F}$; 212°F .

Задача 1.7. При встановленні своєї шкали Фаренгейт прийняв за нормальну температуру людського тіла 96°F . Яке це значення температури в градусах Цельсія?

Відповідь: $t = 35,6^\circ\text{C}$.

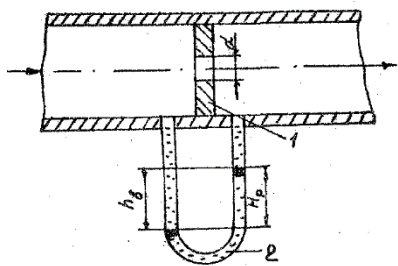
Задача 1.8. Внутрішня енергія робочого тіла змінюється від 1200 кДж до 3000 кДж, а ентальпія – від 400 ккал до 1000 ккал. Визначити зміну тиску робочого тіла, якщо об'єм тіла $V = 1200 \text{ л}$ при цьому не змінюється.

Відповідь: $\Delta p = +593 \text{ кПа}$.

Задача 1.9. Пневматичний прес з діаметром поршня 0,5 м розвиває зусилля в 1 МН при барометричному тиску 745 мм рт.ст. Який абсолютний тиск повітря в робочому циліндрі пресу (МПа , бар, кГ/см^2) і як зміниться зусилля, що розвивається пресом, якщо при незмінному абсолютному тиску повітря в циліндрі пресу, барометричний тиск зростає до 760 мм рт.ст.?

Відповідь: $p = 5,195 \text{ МПа} = 51,95 \text{ бар} \approx 53 \text{ кГ/см}^2$; $F = 0,999 \text{ МН}$.

Задача 1.10. Для вимірювання витрат рідини або газів використовують дросельні діафрагми (рис.1.4). Рідина, що рухається в трубі проходить через



дросельну діафрагму 1. В результаті дроселювання тиск за діафрагмою стає меншим, ніж перед нею. Перепад тиску на діаграмі вимірюється диференціальним U-подібним манометром 2. Масова витрата рідини підраховується за формулою:

$$m_c = \alpha f \sqrt{2(\Delta p) \rho}, \text{ де } m_c - \text{шукана витрата рідини,}$$

Рис.1.4. до задачі 1.10. кг/с; α – постійний коефіцієнт; f – площа вхідного перерізу діафрагми, m^2 ; Δp – перепад тиску на діаграмі, Па; ρ – густина рідини, $кг/м^3$. Визначити масову витрату води, якщо відомо, що $\alpha = 0,83$; $\rho = 0,998 \text{ г/см}^3$; покази диференційного манометра $H_p = 30 \text{ мм рт.ст.}$, діаметр вхідного отвору діафрагми $d = 10 \text{ мм}$.

Яка буде помилка в розрахунках у відсотках і в який бік, якщо не враховувати вагу стовпу води над ртуттю в лівій половині дифманометру?

Відповідь: $m_c = 0,177 \text{ кг/с}$; помилка дорівнює 3,95% в сторону збільшення.

Задача 1.11. Один кіломоляр ідеального газу за нормальних умов має густину $\rho = 1,251 \text{ кг/м}^3$; $0,804 \text{ кг/м}^3$; $1,250 \text{ кг/м}^3$. Визначити, що це за газ. Скористатися даними табл. П.1.3 додатків.

Відповідь: азот; водяна пара; окис вуглецю.

Задача 1.12. Балон ємністю 40 дм^3 наповнюється киснем з магістралі, в якій питомий об'єм кисню дорівнює $0,005 \text{ м}^3/\text{кг}$. Наповнення відбувається по трубопроводу діаметром 20 мм , в якому кисень рухається з постійною швидкістю 10 м/с . Визначити, за який час відбудеться заповнення балону до густини 100 кг/м^3 ?

Відповідь: $\tau \approx 6,4 \text{ с}$.

Задача 1.13 Перевести в градуси Цельсія наступні температури, виміряні термометром із шкалою Фаренгейта: $-200 \text{ }^\circ\text{F}$; $20 \text{ }^\circ\text{F}$; $200 \text{ }^\circ\text{F}$; $2000 \text{ }^\circ\text{F}$. Перевести в градуси Фаренгейта наступні температури, виміряні в градусах Цельсія: -200°C ; 20°C ; 200°C ; 2000°C .

Відповідь: $t \text{ }^\circ\text{C} = -128,9$; $-6,67$; $93,3$; $1093,3$; $t \text{ }^\circ\text{F} = -328,68$; 392 ; 3632 .

Задача 1.14. В США використовується абсолютна шкала Ренкіна, в якій за нуль відліку прийнята температура абсолютного нуля, а величина

градуса така ж, як і в шкалі Фаренгейта. Визначити температуру t °Ra по цій абсолютній шкалі, якщо t °C = –50; 0; 100; 500; 1000.

Відповідь: t °R_a = 401,67; 491,67; 671,67; 1391,67; 2291,67.

Задача 1.15. В результаті стиснення 10 кг повітря, яке знаходилося при температурі 20 °C і барометричному тиску 750 мм рт.ст., його об'єм зменшився в 2,5 рази, а тиск зріс в 3 рази. Визначити зміну ентальпії повітря в цьому процесі, якщо внутрішня енергія повітря виросла на 50 ккал/кг.

Вказівка: необхідно скористатися співвідношенням $p\nu = (8314/\mu)T$, в якому підставляти p , Па; ν , м³/кг; T , К; μ – з табл. П.1.3 додатків.

Відповідь: $\Delta H = 2261$ кДж.

Задача 1.16. В рівноважному ізотермічному процесі від 5 кг газу відводиться кількість теплоти 2137 кДж. При цьому питома ентропія газу змінюється на 0,71 кДж/(кг К). Визначити температуру газу в цьому процесі, а також зменшилась чи збільшилась його ентропія.

Відповідь: $t = 327$ °C; ентропія газу зменшилась.

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСІВ ТА ЇХ ОБЧИСЛЕННЯ

Мета – поглибити знання про характеристики процесів, способи обчислення кількості теплоти в термодинаміці, види роботи, їх обчислення та графічну інтерпретацію, сформувані вміння обчислювати кількість теплоти і роботи.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Необхідно знати: фізичну сутність понять «теплота», «робота», «кількість теплоти», «кількість роботи»; види роботи, характерні для макроскопічних нерухомих і рухомих робочих тіл, які реалізують різні процеси; як обчислюється робота нерухомого робочого тіла і його потоку в різних процесах; графічну інтерпретацію кількості роботи процесу; способи обчислення кількості теплоти і їх суть; фізичну сутність поняття «теплоємність робочого тіла в даному процесі», класифікацію теплоємностей, зв'язок між різними теплоємностями; методику розрахунку кількості теплоти за допомогою середніх теплоємностей; графічну інтерпретацію кількості теплоти процесу; математичні властивості характеристик процесу.

Рекомендована література: [1.1], [1.2], [1.4], [3.2].

Рекомендації з вивчення матеріалу по темі

Усвідомити фізичну сутність понять «теплота», «робота», «кількість теплоти», а також якісну відмінність понять «теплота» і «робота». Вивчити, як обчислюється термодинамічна (деформаційна) робота процесу для нерухомого тіла і види роботи, яку виконує потік робочого тіла при зміні об'єму в каналі довільної форми з рухомими стінками. Знати, як обчислюються: робота проштовхування; роботи, пов'язані зі зміною кінетичної енергії потоку і потенційної енергії його положення в просторі; наявна і технічна роботи потоку. Усвідомити сенс графічної інтерпретації кількості термодинамічної і наявної роботи.

Розглянути спосіб обчислення кількості теплоти, який ґрунтується на визначенні параметру «ентропія». Усвідомити сенс графічної інтерпретації кількості теплоти. Розглянути спосіб обчислення кількості теплоти, який ґрунтується на понятті теплоємності робочого тіла в даному процесі. Вивчити класифікацію теплоємностей (істинна, середня; питомі – масова, об'ємна, молярна; ізобарна, ізохорна), вивчити аналітичні залежності між різними теплоємностями, звернувши увагу на те, до якої кількості речовини відносять теплоємності при обчисленні їх питомих значень. Вивчити методики розрахунку кількості теплоти, які використовують різні теплоємності, зокрема середні в інтервалі температур від 0 до t °C. Ознайомитися з таблицями теплоємностей газів та методиками їх використання. Вивчити математичні властивості характеристик процесу.

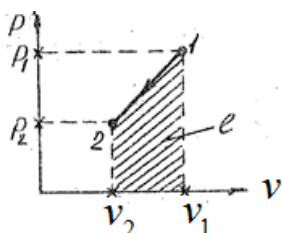
Питання для самоконтролю знань

1. Що таке термодинамічний процес, і які величини слугують його характеристиками?
2. Дайте визначення поняття «робота» і перерахуйте, які види роботи розрізняють в технічній термодинаміці?
3. Що таке термодинамічна (деформаційна) робота, функцією чого вона є і як обчислюється?
4. В якій системі координат робота зображується площею під кривою процесу? Графічна інтерпретація кількості термодинамічної роботи.
5. Чому в якості робочих тіл використовують речовини в газоподібному і пароподібному стані?
6. На що витрачається робота розширення робочого тіла при здійсненні термодинамічного процесу в потоці?
7. Що таке робота проштовхування і як вона обчислюється?
8. Що таке наявна робота потоку, як вона обчислюється і як зображується її кількість в p, v - системі координат?

9. Що таке технічна робота потоку? Як вона співвідноситься з роботою розширення і наявною роботою?
10. Дайте визначення поняття «теплота». Яка якісна відмінність між поняттями «теплота» і «робота»?
11. Які способи обчислення кількості теплоти існують в термодинаміці? Їх суть.
12. Тлумачення алгебраїчних знаків при числових значеннях характеристик процесів.
13. Графічна інтерпретація кількості теплоти процесу.
14. Які математичні властивості є у характеристик процесу?
15. Що називають теплоємністю тіла в даному процесі і як класифікують теплоємність в термодинаміці?
16. Яка відмінність істинної теплоємності від середньої? Яка залежність між ними?

Приклади

Приклад 2.1. Газоподібне робоче тіло масою 10 кг здійснює термодинамічний процес, рівняння якого має вигляд $p/v = \text{const}$. В початковому стані тиск та питомий об'єм газу дорівнюють відповідно $p_1 = 10$ бар і $v_1 = 0,01$ м³/кг. В кінцевому стані співвідношення тисків $p_1/p_2 = 2$. Визначити величину та знак термодинамічної роботи в цьому процесі та дати графічну інтерпретацію рішення.



Розв'язання. За визначенням $L = ml = m \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv$.

Оскільки, $p/v = p_1/v_1 = p_2/v_2 = \text{const}$, то $p = v (p_1/p_2)$, а так як $p_1/p_2 = 2$, то і $v_1/v_2 = 2$. Тоді $L = -3/8 \cdot 10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 = -3/8 \cdot 10^4 \text{ Дж} = -3,75 \text{ кДж}$. Графічна інтерпретація в p - v коор-

Рис.2.1. До прикладу 2.1 динатах зображена на рис.2.1.

Відповідь: $L = -3,75 \text{ кДж}$.

Приклад 2.2. Обчислити термодинамічну роботу, що здійснюється над газом при його стисненні в процесі, рівняння якого $\delta v^n = \text{const}$, де n – деяке постійне число. Початковий стан газу характеризується параметрами $p_1 = 0,1$ МПа, $V_1 = 3 \text{ м}^3$, а кінцевий – параметрами $p_2 = 0,5$ МПа і $V_2 = 0,8 \text{ м}^3$.

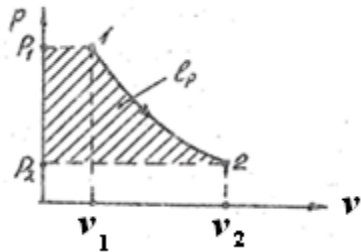
Розв'язання. За визначенням $L = ml = m \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv$. Оскільки $p v^n = p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = \text{const}$, то отримуємо $L = m p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^n} = m p_1 v_1^n \left[\frac{1}{1-n} v^{1-n} \right]_{v_1}^{v_2} = \frac{m}{n-1} (p_1 v_1 -$

$-p_2 v_2) = (p_1 V_1 - p_2 V_2) / (n - 1)$. Для обчислення L необхідно знати значення n . Так як $p_1 (V_1/m)^n = p_2 (V_2/m)^n$, то $n = \lg(p_1/p_2) / \lg(V_1/V_2)$. Знаходимо: $n = \lg(1/5) / \lg(0,8/3) \approx 1,218$; $L = (0,1 \cdot 10^6 \cdot 3 - 0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,8) / (1,218 - 1) = -450 \text{ кДж}$.

Відповідь: $L = -450 \text{ кДж}$.

Приклад 2.3. Газ під тиском $p_1 = 16$ ат має густину $\rho_1 = 3,33 \text{ кг/м}^3$. Він розширюється так, що в кінці процесу, рівняння якого $p v = \text{const}$, об'єм газу стає в 3 рази більше початкового. Визначити питому наявну роботу* газу в цьому процесі та дати графічну інтерпретацію рішення.

Розв'язання. За визначенням $l_p = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp$. Оскільки $p v = p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{const}$, то $v = p_1 v_1 / p$ і тоді $l_p = - p_1 v_1 \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = - p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$



$$= \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln 3; \quad p_1 = 16 \text{ ат} = (16 \cdot 10^4 \cdot 9,81) \text{ Па};$$

$$l_p = \frac{16 \cdot 10^4 \cdot 9,81}{3,33} 10^{-3} \ln 3 \approx 518 \text{ кДж/кг}.$$

Графічна інтерпретація рішення в p, v – координатах показана на рис.2.2.

Рис.2.2. До прикладу 2.3.

Відповідь: $l_p \approx 518 \text{ кДж/кг}$.

Приклад 2.4. Визначити питому наявну роботу в процесі зміни стану робочого тіла, якщо при цьому об'єм тіла зменшився в 3 рази, тиск зріс в 5 разів, а над тілом здійснена термодинамічна робота $l = -1000 \text{ кДж/кг}$. Початковий стан робочого тіла характеризується значеннями параметрів $p_1 = 3$ бар і $\rho_1 = 0,5 \text{ кг/м}^3$.

Розв'язання. За визначенням $\delta l_p = -v(p) dp$. З іншого боку $-v(p) dp = p(v) dv - d(pv)$. Звідси витікає, що $-\int_{p_1}^{p_2} v(p) dp = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv - \int_{p_1 v_1}^{p_2 v_2} d(pv)$ або

$$l_p = l - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = l - \frac{p_1}{\rho_1} \left(\frac{p_2}{p_1} \frac{v_2}{v_1} - 1 \right) = l - \frac{2}{3} \frac{p_1}{\rho_1}.$$

$$l_p = -1000 - \frac{2}{3} \cdot \frac{3 \cdot 10^5}{0,5} \cdot 10^{-3} \approx -1400 \text{ кДж/кг}.$$

Відповідь: $l_p = -1400 \text{ кДж/кг}$.

Приклад 2.5. Об'ємна продуктивність калориферної установки системи опалення складає $5 \text{ м}^3/\text{с}$ повітря при його питомому об'ємі $v = 0,83 \text{ м}^3/\text{кг}$.

* Питома наявна робота – робота зміни тиску або робота переміщення у відкритих термодинамічних системах, яка дорівнює сумі роботи зміни об'єму та роботи протитиску.

Визначити теплову продуктивність калорифера, якщо нагрівання повітря здійснюється від температури 288 К до 338 К. Прийняти, що теплоємність повітря не залежить від температури та дорівнює $c_p = 1 \text{ кДж / (кг К)}$.

Розв'язання. Теплова продуктивність $Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT$. Так як $c_p = \text{const}$, то $Q = mc_p(T_2 - T_1)$, де $m = V/\nu$ – масова витрата повітря. Отримуємо: $Q = \frac{V}{\nu} c_p (T_2 - T_1) = \frac{5}{0,83} 1(338 - 288) \approx 301 \text{ кВт}$.

Відповідь: $Q = 301 \text{ кВт}$.

Приклад 2.6. Розрахувати кількість теплоти, що підведена в процесі рівноважного нагрівання від $t_1 = 100^\circ\text{C}$ до $t_2 = 600^\circ\text{C}$ до 5 кг робочого тіла, а також зміну ентропії цього тіла, якщо його теплоємність в даному процесі змінюється за законом $c_p = 1,84 + 0,00029t$, кДж / (кг К).

Розв'язання. За визначенням $\delta q = c(T)dt$. Звідси витікає, що $Q = mq = m \int_{T_1}^{T_2} c(T)dt = m \int_{T_1}^{T_2} [1,84 + 0,00029(T - 273,15)]dt = m \int_{T_1}^{T_2} [(1,76 + 0,00029T)]dt = m[1,76(T_2 - T_1) + 0,000145(T_2^2 - T_1^2)]$. За визначенням $ds = \delta q/T$. Звідси випливає, що $\Delta S = m\Delta s = m \int_{T_1}^{T_2} \frac{[1,84 + 0,00029(T - 273,15)]}{T} dt = m[1,76 \ln(T_2/T_1) + 0,00029(T_2 - T_1)]$. Підставляючи числові значення температур, отримуємо: $Q = 5[1,76(873 - 373) + 1,45(8,73^2 - 3,73^2)] \approx 4827 \text{ кДж}$. $\Delta S = 5[1,76 \ln(873/373) + 0,00029(873 - 373)] \approx 8,21 \text{ кДж/К}$.

Відповідь: $Q = 4827 \text{ кДж}$; $\Delta S = 8,21 \text{ кДж/К}$.

Задачі

Задача 2.1. Робоче тіло змінює свій стан в рівноважному процесі, рівняння якого $pv^n = \text{const}$, де n – постійне число. Розрахувати питомі термодинамічну і наявну роботи цього процесу, якщо робоче тіло в початковому і кінцевому станах характеризується наступними значеннями параметрів: $p_1 = 1 \text{ МПа}$; $v_1 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$; $p_2 = 0,2 \text{ МПа}$; $v_2 = 3 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Відповідь: $l = 936 \text{ кДж/кг}$; $l_p = 1140 \text{ кДж/кг}$.

Задача 2.2. Газ, що має об'єм $V_1 = 10 \text{ м}^3$, стискується в процесі, рівняння якого $pv = \text{const}$. Розрахувати питомий об'єм газу в кінці стиснення, якщо маса газу $m = 15 \text{ кг}$, тиск $p_1 = 1,5 \text{ МПа}$, а на стиснення витрачена робота $L = -1963 \text{ кДж}$.

Відповідь: $v_2 = 0,58 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Задача 2.3. Робоче тіло, початковий стан якого характеризується значеннями параметрів $p_1 = 0,15$ МПа та $\rho_1 = 0,2$ кг/м³, здійснило рівноважний термодинамічний процес, в якому об'єм тіла зменшився в 5 разів, а тиск збільшився в 10 разів. На здійснення процесу витрачена термодинамічна робота (робота стиснення), що дорівнює 1717 кДж/кг. Визначити наявну роботу цього процесу.

Відповідь: $l_p = -965$ кДж/кг.

Задача 2.4. Значення теплоємності газу при постійному тиску експериментально визначають в проточному калориметрі (рис.2.3). Для цього через трубопровід, всередині якого розташований електрообігрівач, пропускають газ, що досліджують, і нагрівають його. Вимірюють кількість газу, що пройшов через трубопровід, температуру газу перед і після електрообігрівача і витрату електроенергії на нагрівання газу. Тиск газу в трубопроводі практично незмінний. Маючи в своєму розпорядженні такі дані, за відомими формулами можна розрахувати теплоємність газу при постійному тиску. Розрахувати питому теплоємність повітря на основі наступних даних експерименту: витрата повітря $m = 690$ кг/год; потужність електрообігрівача $N_{el} = 0,5$ кВт; температура повітря перед нагрівачем $t_1 = 18$ °С, після нагрівача $t_2 = 20,6$ °С.

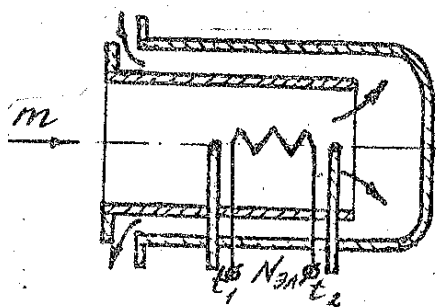


Рис.2.3. До задачі 2.4.

практично незмінний. Маючи в своєму розпорядженні такі дані, за відомими формулами можна розрахувати теплоємність газу при постійному тиску. Розрахувати питому теплоємність повітря на основі наступних даних експерименту: витрата повітря $m = 690$ кг/год; потужність електрообігрівача $N_{el} = 0,5$ кВт; температура повітря перед нагрівачем $t_1 = 18$ °С, після нагрівача $t_2 = 20,6$ °С.

Відповідь: $c_p = 1$ кДж/(кг К).

Задача 2.5. В результаті підведення теплоти стан 10 кг робочого тіла, яке спочатку знаходилося за нормальних умов, змінився в рівноважному процесі так, що абсолютна температура тіла збільшилася вдвічі. Вважаючи теплоємність робочого тіла в цьому процесі такою, що не залежить від температури і дорівнює 1 кДж/(кг К), розрахувати зміну ентропії тіла в цьому процесі та кількість підведеної теплоти.

Відповідь: $\Delta S = 6,92$ кДж/К; $Q = 2730$ кДж.

Задача 2.6. Питома ентропія робочого тіла збільшується на $\Delta s = 1$ кДж/(кг К) при підводі до нього деякої кількості теплоти в рівноважному ізотермічному процесі при $t = 300$ °С. Визначити кількість теплоти цього процесу, якщо в початковому стані питомий об'єм тіла $v_1 = 0,5$ м³/кг, а саме воно займало об'єм $V_1 = 30$ м³.

Відповідь: $Q = 34,38$ МДж.

Задача 2.7. Один кіломоляр повітря змінює свій стан в процесі, рівняння якого $pv = \text{const}$, так, що спочатку розширюється від об'єму $V_1 = 1 \text{ м}^3$ до об'єму $V_2 = 22,4 \text{ м}^3$, а потім стискується до об'єму $V_3 = 0,5 V_2$. Визначити величину і знак сумарної термодинамічної роботи цього процесу. Вказівка: врахувати, що об'єм $V_2 = V_\mu^\circ$.

Відповідь: $L_{1-2} = 7057 \text{ кДж}$; $L_{2-3} = -1573 \text{ кДж}$; $L_\Sigma = 5483 \text{ кДж}$.

Задача 2.8. Розрахуйте термодинамічну і наявну роботи оборотного процесу зміни стану робочого тіла масою 15 кг , якщо рівняння процесу $pv^n = \text{const}$, а початковий та кінцевий стани робочого тіла характеризуються наступними значеннями параметрів: $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$; $v_1 = 4 \text{ м}^3/\text{кг}$; $p_2 = 2,0 \text{ МПа}$.

Відповідь: $L = -30000 \text{ кДж}$; $L_p = -60000 \text{ кДж}$.

Задача 2.9. Циліндр компресору з об'ємом над поршнем $V_1 = 2 \text{ л}$ заповнений азотом при тиску за манометром $0,15 \text{ МПа}$. При переміщенні поршня об'єм азоту зменшується в 5 разів, а тиск за манометром збільшується. Визначити, яким буде цей тиск, якщо стиснення здійснюється в оборотному процесі, рівняння якого $pv^{1,22} = \text{const}$. Розрахувати термодинамічну роботу стиснення. Барометричний тиск прийняти $B = 0,1 \text{ МПа}$.

Відповідь: $p_{\text{надл}2} = 1,68 \text{ МПа}$; $L = -0,966 \text{ кДж}$.

Задача 2.10. В повітропідігрівнику котельного агрегату повітря нагрівається від 30 до $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Його густина при цьому зменшується від $1,165$ до $0,674 \text{ кг/м}^3$. Визначити кількість теплоти, яка підведена до повітря протягом години, і термодинамічну роботу, що здійснена повітрям при нагріванні, якщо його витрата дорівнює 1000 кг за годину. Тиск повітря в підігрівачі прийняти постійним та рівним $0,1 \text{ МПа}$. Теплоємність повітря $c_p = 1 \text{ кДж/кг}$.

Відповідь: $Q = 22 \cdot 10^4 \text{ кДж}$; $L = 6,253 \cdot 10^4 \text{ кДж}$.

Задача 2.11. Розрахувати приріст ентропії та кількість підведеної теплоти в процесі нагрівання робочого тіла масою 5 кг від 27 до $325 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо теплоємність тіла в цьому процесі змінюється за законом $c = 0,5 + 2 \cdot 10^{-3} t \text{ Дж/(кгК)}$.

Відповідь: $\Delta S = 2,82 \text{ кДж/К}$; $Q = 1269 \text{ кДж}$.

Задача 2.12. В циліндрі двигуна внутрішнього згоряння повітря має температуру $500 \text{ }^\circ\text{C}$. До повітря підводиться кількість теплоти, що призводить до збільшення об'єму повітря в $2,2$ рази при практично незмінному тиску в циліндрі 4 МПа . Розрахувати температуру повітря в кінці процесу, питому кількість теплоти та роботи цього процесу, якщо питома теплоємність повітря в цьому процесі не залежить від температури.

Відповідь: $t = 1428 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 266,2 \text{ кДж/кг}$; $q = 1076 \text{ кДж/кг}$.

Задача 2.13. 10 кг повітря нагрівається при сталому об'ємі на 200 °C і після цього розширюється до початкової температури в процесі $pv^k = \text{const}$, де $k = c_p/c_v$, а теплоємності c_p і c_v не залежать від температури. Повітря вважати ідеальним газом. Розрахувати термодинамічну роботу цього процесу.

Відповідь: $L \approx 1435$ кДж.

Задача 2.14. 5 м³ азоту, який знаходиться при тиску $p_1 = 0,4$ МПа та температурі $t_1 = 90$ °C розширюється політропно до тиску $p_2 = 0,1$ МПа, при якому займає об'єм $V_2 = 15$ м³. Вважаючи теплоємність азоту $\mu c_v = 20,9$ кДж/(кмоль К), розрахувати показник політропи, теплоту процесу, роботу розширення та зміну внутрішньої енергії газу.

Відповідь: $n = 1,262$; $Q = 663$ кДж; $L = 1908$ кДж; $\Delta U = -1258$ кДж.

2.3. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Мета – поглибити знання про Перший закон термодинаміки, сформулювати вміння застосовувати цей закон при аналізі термодинамічних процесів.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Необхідно знати: фізичну сутність закону і його основні формулювання; математичні вирази закону в інтегральній та диференціальній формах для всієї маси і одного кілограма як нерухомого робочого тіла, так і його потоку; схеми енергобалансу і як вони використовуються при аналізі процесів зміни стану робочих тіл за допомогою Першого закону термодинаміки.

Рекомендована література: [1.1], [1.2], [1.4], [3.2].

Рекомендації з вивчення матеріалу по темі

Усвідомити сутність Першого закону термодинаміки. Вивчити основні формулювання цього закону, звернувши увагу на те, що в розглянутих випадках об'єктами його застосування служать системи, при взаємодії яких з навколишнім середовищем змінюється тільки їх внутрішня енергія. Вивести самостійно і записати математичні вирази закону в їх першій і другій формах запису, в тому числі і у вигляді термодинамічних тотожностей. Усвідомити сутність понять «перетворення теплоти в роботу» і «вічний двигун першого роду». Вивчити властивості функцій стану – внутрішньої енергії та ентальпії, звернувши увагу на фізичну сутність цих величин, зокрема, на те, що значення ентальпії як повної енергії, пов'язаної з даним станом системи, залежить не тільки від стану системи, але і від зовнішніх умов, в яких знаходиться система. Абсолютну величину внутрішньої енергії та ентальпії робочого тіла в

технічній термодинаміці принципово неможливо визначити, тому значення $U = 0$ і $H = 0$ приписують цим величинам тіла, яке знаходиться в деякому певному стані, вибираючи їх з міркувань практичної зручності з безлічі можливих станів.

Усвідомити принцип складання схем енергобалансу для процесів зміни стану робочих тіл і вивчити формальні правила побудови цих схем.

Вивчаючи Перший закон термодинаміки для потоку, слід засвоїти припущення, зроблені при виведенні рівняння цього закону для потоку, вивести самостійно це рівняння в розгорнутій формі і завчити його. Усвідомити сутність кожного члена рівняння, а також взаємозв'язок між наявною і технічною роботами потоку.

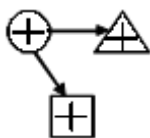
Питання для самоконтролю знань

1. Сутність Першого закону термодинаміки.
2. Чому цей закон є законом збереження і перетворення енергії?
3. Наведіть відомі Вам формулювання Першого закону термодинаміки і дайте їм тлумачення.
4. Що таке довічний двигун першого роду і чому його не можливо побудувати?
5. Обґрунтуйте за допомогою Першого закону термодинаміки принцип еквівалентності теплоти і роботи в кругових процесах.
6. Запишіть відомі Вам аналітичні вирази Першого закону термодинаміки: а) в його першій формі запису; б) в його другій формі.
7. Поясніть, що таке схема енергобалансу та принцип її складання? Зобразіть такі схеми для основних термодинамічних процесів.
8. Доведіть, у якому процесі зміни стану вся підведена до робочого тіла кількість теплоти витрачається на зміну його: а) внутрішньої енергії; б) ентальпії?
9. Що додатково враховується при виведенні рівняння Першого закону термодинаміки для потоку в порівнянні з рівнянням для нерухомого робочого тіла?
10. Які допущення покладені в основу виведення рівняння Першого закону термодинаміки для потоку?
11. Запишіть рівняння Першого закону термодинаміки для потоку в розгорнутій формі і поясніть сутність кожного члена рівняння.

Приклади

Приклад 3.1. В рівноважному процесі, що протікає при умові $p = \text{const}$, внутрішня енергія робочого тіла змінюється від 300 до 700 ккал, а його ентальпія – від 1800 до 4000 кДж. Розрахувати кількість теплоти, термодинамічну роботу процесу та зобразити схему його енергобалансу.

Розв'язання. Згідно Першому закону термодинаміки $Q = \Delta U + L = \Delta H + L_p$. Якщо процес ізобарний, то наявна робота $L_p = - \int_{p_1}^{p_2} v(p) dp = 0$. Тоді $L = \Delta H - \Delta U$; $Q = \Delta H = H_2 - H_1$; $\Delta U = U_2 - U_1$; $Q = 4000 - 1800 = 2200$ кДж; $L = 2200 - (700 - 300) \cdot 4,187 = 525$ кДж. Схема енергобалансу має вигляд:



Відповідь: $Q = 2200$ кДж; $L = 525$ кДж.

Приклад 3.2. Робоче тіло з початкового стану 1 переходить до стану 2 в процесі 1A2, здійснюючи при цьому роботу, яка дорівнює 100 кДж. При переході із стану 2 в стан 1 шляхом 2Б1 від робочого тіла було відведено 30 кДж теплоти, а його внутрішня енергія зросла на 25 кДж. Визначити роботу циклу 1A2Б1 та кількість теплоти, що підведена до робочого тіла в процесі 1A2. Зобразити схеми енергобалансів для процесів, що розглядаються, і процеси в p, v системі

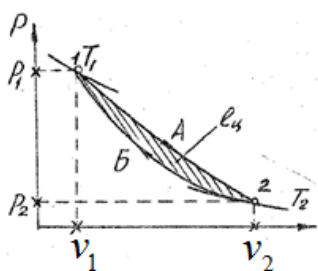


Рис.3.1. До прикладу 3.2. координат (рис.3.1).

Розв'язання. Згідно з Першим законом термодинаміки $Q = \Delta U + L$. Для процесу 1A2: $Q_{1A2} = \Delta U_{12} + L_{1A2}$. Для процесу 2Б1: $Q_{2Б1} = \Delta U_{21} + L_{2Б1}$. Так як для обох процесів співпадають відповідно початкові та кінцеві стани, то $\Delta U_{12} = -\Delta U_{21}$. Тоді $\Delta U_{12} = -25$ кДж і $Q_{1A2} = -25 + 100 = 75$ кДж. Робота циклу $L_{\text{ц}} = L_{1A2} + L_{2Б1}$; $L_{2Б1} = Q_{2Б1} - \Delta U_{21}$; $L_{2Б1} = -30 - 25 = -55$ кДж; $L_{\text{ц}} = 100 + (-55) = 45$ кДж.

Схема енергобалансу процесу 1A2 має вигляд:

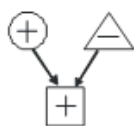
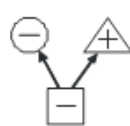


Схема енергобалансу процесу 2Б1 має вигляд:

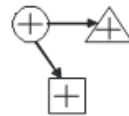


Відповідь: $L_{\text{ц}} = 45$ кДж; $Q_{1A2} = 75$ кДж.

Приклад 3.3. В ізотермічному процесі при $t = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ до робочого тіла підводиться кількість теплоти 300 ккал, а робоче тіло виконує при цьому 400 кДж роботи. Визначити зміну ентропії та внутрішньої енергії робочого тіла в цьому процесі та зобразити схему енергобалансу процесу.

Розв'язання. Згідно з Першим законом термодинаміки $Q = \Delta U + L$, звідки $\Delta U = Q - L$. У випадку рівноважного процесу зовнішня теплота процесу $Q = \int_{S_1}^{S_2} T(S)dS$, звідки при $T = \text{const}$ впливає $\Delta S = Q / T$; $\Delta U = 300 \cdot 4,187 - 400 \approx 856$ кДж; $\Delta S = (300 \cdot 4,187) / (77+273) \approx 3,58$ кДж/К.

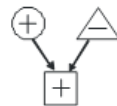
Схема енергобалансу має вигляд:



Відповідь: $\Delta U = 856$ кДж; $\Delta S = 3,58$ кДж/К.

Приклад 3.4. Газ в кількості $V_1 = 3\text{ м}^3$, який знаходиться під тиском $p_1 = 1$ МПа збільшує свій об'єм в 4 рази в процесі $pV = \text{const}$. При цьому до газу підводиться енергія в формі теплоти в кількості 838 кДж. Визначити термодинамічну роботу та зміну внутрішньої енергії газу в цьому процесі та зобразити схему енергобалансу процесу.

Розв'язання. Згідно з Першим законом термодинаміки $Q = \Delta U + L$, звідки $\Delta U = Q - L$. Термодинамічна робота в рівноважному процесі $L = \int_{V_1}^{V_2} p(V)dV$. Звідси $L = p_1 V_1 \ln(V_2/V_1) = p_1 V_1 2,3 \lg(V_2/V_1)$; $L = 10^6 \cdot 3 \cdot 2,3 \cdot \lg 4 = 4080$ кДж; $\Delta U = 838 - 4080 = -3242$ кДж. Схема енергобалансу має вигляд:



Відповідь: $L = 4080$ кДж; $\Delta U = -3242$ кДж.

Приклад 3.5. В каналі довільної форми тече повітря, масова витрата якого $m = 10$ кг/с. На вході в канал питома ентальпія повітря $h_1 = 586$ кДж/кг, його швидкість $w_1 = 42,5$ м/с, а на виході – $h_2 = 600$ кДж/кг і $w_2 = 21,2$ м/с. До повітря підводиться зовні енергія в формі теплоти в кількості 60 кВт. Розрахувати технічну роботу, що здійснюється потоком повітря, якщо вхідний і вихідний перерізи каналу розташовані над деякою горизонтальною площиною на висоті відповідно $Z_1 = 60$ м і $Z_2 = 20$ м.

Розв'язання. Згідно з Першим законом термодинаміки $Q = m(h_2 - h_1) + m \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \right) + L_{\text{tex}} + mg(Z_2 - Z_1)$. Звідси впливає, що $L_{\text{tex}} = Q - m(h_2 - h_1) -$

$-m\left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2}\right) - mg(Z_2 - Z_1)$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо $L_{\text{tex}} = 60 - 10(600 - 586) - 10\left[\left(21,2^2/2\right) - \left(42,5^2/2\right)\right]10^3 - 10 \cdot 9,81 \cdot (20 - 60) \cdot 10^{-3} \approx -67,5 \text{ кВт}$.

Відповідь: над потоком здійснюється робота $L_{\text{tex}} = -67,5 \text{ кВт}$.

Приклад 3.6. Масова витрата газу в стаціонарному потоці $m = 7200 \text{ кг/год}$. При течії з постійною швидкістю в каналі зменшуються: абсолютний тиск газу від $0,75 \text{ МПа}$ до $2,25 \text{ ат}$, густина газу від $4,5$ до $1,65 \text{ кг/м}^3$, внутрішня енергія газу на 100 кДж/кг . Розрахувати кількість теплоти даного процесу, якщо потоком здійснюється технічна робота $L_{\text{tex}} = 1500 \text{ кДж/с}$.

Розв'язання. Згідно з Першим законом термодинаміки $Q = \Delta U + L$. Термодинамічна робота $L = L_{\text{к}} + L_{\text{п}} + L_{\text{tex}}$, де $L_{\text{к}} = 0,5m(w_2^2 - w_1^2)$ – робота, що витрачається на зміну зовнішньої кінетичної енергії потоку; $L_{\text{п}} = m(p_2 v_2 - p_1 v_1)$ – робота проштовхування; L_{tex} – технічна робота. Оскільки, $w = \text{const}$, то $L_{\text{к}} = 0$ і тоді $Q = m\Delta u + (p_1/\rho_1)((p_2/\rho_2)(\rho_1/\rho_2) - 1) + L_{\text{tex}}$; $Q = (7200/3600)(-100) + (7200/3600)(0,75 \cdot 10^3/4,5)((2,25/7,5)(4,5/1,65) - 1) + 1500 \approx 1240 \text{ кВт}$.

Відповідь: до потоку підводиться енергія в формі теплоти в кількості $Q = 1240 \text{ кВт}$.

Приклад 3.7. При адіабатній течії в нерухомому каналі тиск газу зменшується в 6 разів, а густина газу – в 4 рази. При цьому швидкість потоку зростає від 50 до 950 м/с . Початковий тиск газу $p_1 = 2,5 \text{ МПа}$, питомий об'єм $v_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$. Розрахувати кількість деформаційної роботи та роботи переміщення в цьому процесі, а також зміну калоричних параметрів газу.

Розв'язання. Згідно балансовому рівнянню для роботи потоку питома робота дорівнює: $l = l_{\text{п}} + \Delta E_{\text{п}} = \Delta E_{\text{к}} + l_{\text{tex}} + \Delta E_{\text{п}}$, (1)
де $l_{\text{п}}$, l_{tex} – питомі роботи переміщення та технічна відповідно; $\Delta E_{\text{п}}$, $\Delta E_{\text{к}}$ – зміни потенційної та кінетичної енергії потоку відповідно.

Оскільки канал нерухомий, то $l_{\text{tex}} = 0$ і $l_{\text{п}} + \Delta E_{\text{п}} = \Delta E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{п}}$, (2)
Звідки випливає, що $l_{\text{п}} = \Delta E_{\text{к}}$.

Зміна кінетичної енергії потоку $\Delta E_{\text{к}} = (w_2^2 - w_1^2)/2$, а зміна його потенційної енергії $\Delta E_{\text{п}} = p_2 v_2 - p_1 v_1 = p_1 v_1 [(p_2 v_2 / p_1 v_1) - 1]$.

В адіабатному процесі ($q = 0$; $\delta q = 0$) маємо: $ds = \delta q / T$, звідки $\Delta s = 0$; $q = \Delta u + l$, звідки $\Delta u = -l$; $q = \Delta h + l_{\text{п}}$, звідки $\Delta h = -l_{\text{п}}$.

Підставляючи числові значення відповідних величин у формули, отримуємо: $\Delta E_k = (950^2 - 50^2) / 2 = 450 \text{ кДж/кг}$; $\Delta E_{\text{п}} = 2,5 \cdot 10^6 \cdot 0,12 (4/6 - 1) = -100 \text{ кДж/кг}$; $l = 450 - 100 = 350 \text{ кДж/кг}$; $l_{\text{п}} = 450 \text{ кДж/кг}$; $\Delta s = 0$; $\Delta u = -350 \text{ кДж/кг}$; $\Delta h = -450 \text{ кДж/кг}$.

Відповідь: рівноважний адіабатний процес – ізоентропійний; $l = 350 \text{ кДж/кг}$; $l_{\text{п}} = 450 \text{ кДж/кг}$; $\Delta s = 0$; $\Delta u = -350 \text{ кДж/кг}$; $\Delta h = -450 \text{ кДж/кг}$.

Задачі

Задача 3.1. При рівноважній взаємодії робочого тіла з навколишнім середовищем його ентальпія зменшується на 293 кДж/кг, а внутрішня енергія – на 210 кДж/кг. Визначити кількість теплоти, термодинамічну і наявну роботи в цьому процесі, якщо він протікає за наступних умов: а) $p = \text{const}$; б) $v = \text{const}$; в) $\delta q = 0$; $q = 0$. Зобразити схеми енергобалансів для цих випадків.

Відповідь: а) $q = -293 \text{ кДж/кг}$; $l = -84 \text{ кДж/кг}$; $l_p = 0$;

б) $q = -210 \text{ кДж/кг}$; $l = 0$; $l_p = +84 \text{ кДж/кг}$;

в) $q = 0$; $l = +210 \text{ кДж/кг}$; $l_p = +293 \text{ кДж/кг}$.

Задача 3.2. Робоче тіло переходить із початкового стану 1 в стан 2 в рівноважному процесі 1Б2. При цьому до робочого тіла підводиться кількість теплоти 30 кДж, а його внутрішня енергія зменшується на 10 кДж. При переході із стану 2 в стан 1 шляхом 2А1 від робочого тіла відводиться в навколишнє середовище кількість теплоти 50 кДж. Визначити роботу, що виконується в процесі 1Б2, та загальну роботу, що витрачається на реалізацію циклу. Зобразити схеми енергобалансів цих процесів та принципові схеми процесів в p, v – системі координат.

Відповідь: $L_{1Б2} = +40 \text{ кДж}$; $L_{\text{ц}} = -20 \text{ кДж}$.

Задача 3.3. В рівноважному ізотермічному процесі при $t = 27^\circ\text{C}$ ентропія газу зростає на 3,2 кДж/К, а його внутрішня енергія при цьому зростає на 838 кДж. Визначити термодинамічну роботу та зобразити схему енергобалансу цього процесу.

Відповідь: $L = 123 \text{ кДж}$.

Задача 3.4. Робоче тіло в кількості $V_1 = 5 \text{ м}^3$ при тиску $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ стискується до тиску $p_2 = 1,5 \text{ МПа}$ в процесі, рівняння якого $pv = \text{const}$. При цьому від тіла відводиться 300 ккал теплоти. Визначити наявну роботу та зміну ентальпії робочого тіла в цьому процесі. Зобразити схему енергобалансу процесу.

Відповідь: $L_p = -2746 \text{ кДж}$; $\Delta H = 1490 \text{ кДж}$.

Задача 3.5. Турбокомпресор всмоктує 30 кг/с повітря з густиною $\rho_1 = 1,15 \text{ кг/м}^3$ при тиску $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ та швидкості $w_1 = 10 \text{ м/с}$. Після компресору тиск $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$, густина повітря $\rho_2 = 3,6 \text{ кг/м}^3$, швидкість $w_2 = 50 \text{ м/с}$. Внутрішня енергія повітря при цьому збільшується на 125 кДж/кг . Визначити необхідну потужність приводу компресору, якщо процес підвищення тиску в компресорі відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем.

Відповідь: $N_k = 5346 \text{ кВт}$.

Задача 3.6. Повітряний компресор стискує 200 кг/год повітря, ентальпія якого при цьому зростає на 100 кДж/кг . Потужність приводу компресора $N_k = 10 \text{ кВт}$. Вважаючи, що втрати відсутні, нехтуючи зміною кінетичної енергії повітря, що стискується, визначити, на скільки градусів нагрівається охолоджуюча компресор вода, якщо її витрата дорівнює $0,15 \text{ кг/с}$.

Відповідь: $\Delta t = 25,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 3.7. Цикл складається з чотирьох процесів АВ, ВС, СД та ДА. Сумарна кількість теплоти циклу $Q_{\text{ц}} = 4187 \text{ Дж}$. Доповнити наведену таблицю відсутніми величинами та зобразити для кожного процесу схему енергобалансу.

Процес	Q , ккал	L , кДж	ΔU , ккал
АВ	-250	...	0
ВС	...	0	3000
СД	0	7325	...
ДА

Задача 3.8. Робоче тіло з початкового стану 1 переходить до стану 2 шляхом 1А2. При цьому його внутрішня енергія змінюється на ΔU , кДж. При переході з стану 2 в стан 1 шляхом 2Б1 кількість теплоти процесу дорівнює Q_{21} , кДж. Визначити роботу циклу 1А2Б1 та кількість теплоти процесу 1А2, якщо відомо, що робота процесу 1А2 дорівнює L_{12} , кДж. Побудувати схеми енергобалансів цих процесів та зобразити принципово ці процеси в p, v – координатах. Вихідні дані для розрахунку взяти з табл. П.2.1 додатків.

Вказівка: зображення процесів в p, v – координатах необхідно починати з проведення через точку 1 лінії $u = \text{const}$, яку в даній задачі можна вважати рівнобічною гіперболою. Чим більше u , тим далі від початку координат розташовується відповідна лінія $u = \text{const}$.

Задача 3.9. В ізотермічному процесі при $t = t \text{ }^\circ\text{C}$, зміна ентропії робочого тіла дорівнює ΔS , кДж/К. Термодинамічна робота процесу дорівнює

L , кДж. Визначити зміну внутрішньої енергії робочого тіла в цьому процесі та зобразити схему енергобалансу процесу. Вихідні дані для розрахунку взяти з табл. П.2.2 додатків.

Задача 3.10. Термічний ККД η_t теплового двигуна, робоче тіло в якому здійснює цикл, – це відношення кількості здійсненої робочим тілом корисної роботи в циклі до кількості теплоти, що підведена до робочого тіла в процесах підводу теплоти цього циклу. Визначити термічний ККД двигуна, в якому робоче тіло здійснює чотирьохпроцесний цикл АВСДА, якщо робота та кількість теплоти кожного з процесів мають наступні значення:

Процеси:	AB	BC	CD	DA
q , кДж/кг	+120	-40	-80	+20
l , кДж/кг	+12	+40	-32	0

Відповідь: $\eta_t = 0,143$.

Задача 3.11. Визначити термодинамічну та наявну роботи потоку робочого тіла, яке рухається в нерухомому каналі, якщо при цьому швидкість потоку зростає від 35 до 875 м/с, а тиск робочого тіла зменшується в 1,5 рази більше, ніж зменшується густина тіла. Течія здійснюється без теплообміну з навколишнім середовищем. Початкові параметри робочого тіла: $p_1 = 0,3$ МПа, $v_1 = 0,15$ м³/кг. Як змінюються калоричні параметри робочого тіла в цьому процесі? Втратами та змінами кінетичної та потенціальної енергій потоку знехтувати.

Відповідь: $l = 367$ кДж/кг; $l_p = 382$ кДж/кг; $\Delta u = -367$ кДж/кг;
 $\Delta h = -382$ кДж/кг; $\Delta s = 0$ кДж/(кг К) .

Задача 3.12. Повітряний компресор стискує 500 кг/год повітря, ентальпія якого при цьому зростає на 275 кДж/кг. Компресор охолоджується водою, витрата якої складає 0,35 кг/с, а збільшення температури після проходження через систему охолодження компресору 20 °С. Нехтуючи втратами та зміною кінетичної та потенціальної енергій повітря, визначити потужність приводу компресора.

Відповідь: $N_k = 8,9$ кВт.

2.4. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Мета – поглибити знання про Другий закон термодинаміки, сформува-ти вміння застосовувати цей закон при аналізі термодинамічних процесів.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Необхідно знати: основні формулювання (Больцмана, Карно, Клаузіуса, Оствальда, Томсона), сутність, аналітичний вираз, межі застосування Друго-го закону термодинаміки; класифікацію циклів; класифікацію теплових ма-шин за корисним ефектом циклу, що здійснюється в них робочим тілом; що таке довічний двигун другого роду; фізичну сутність і способи обчислення показників ефективності термодинамічних циклів – термічного ККД тепло-механічного циклу, теплофікаційного коефіцієнту теплофікацій-ного циклу, холодильного коефіцієнту холодильного циклу і опалювального коефіцієнту циклу опалювального теплового насоса; властивості оборотного циклу Кар-но; середню термодинамічну температуру рівноважного процесу теплообмі-ну, як вона обчислюється в загальному випадку і при постійній теплоємності робочого тіла в процесі; еквівалентний цикл Карно для даного довільного ідеального циклу та як, використовуючи це поняття, обчислюють ефектив-ність довільного ідеального циклу і порівнюють за ефективністю різні цикли; властивості ентропії як параметра стану, термодинамічну сутність цього па-раметра, як змінюється ентропія робочого тіла в розімкнутих процесах при їх оборотному і необоротному протіканні і ентропія ізольованої термодинаміч-ної системи при протіканні в ній оборотних і необоротних процесів; що таке роботоздатність термодинамічної системи і втрата роботоздатності внаслідок необоротності процесів, які протікають в системі; основну властивість не-оборотного циклу Карно.

Рекомендована література: [1.1], [1.2], [1.4], [3.1], [3.2].

Рекомендації з вивчення матеріалу по темі

Другий закон термодинаміки визначає напрям процесів і умови, за яких можливе здійснення несамочинних процесів. Необхідно усвідомити, що між процесами перетворення енергії є істотні відмінності, які не враховуються Першим законом термодинаміки, що принципово можна здійснити не будь-який процес, який не суперечить цьому закону. Слід вивчити приклади про-цесів двох категорій – реальні (природні) і неможливі (протиприродні); усві-домити особливості теплоти, як форми передачі енергії, і перетворення теп-лоти в роботу, звернувши увагу на односпрямованість, довільність і незворо-тність природного процесу теплообміну та на необхідність компенса-ції при

перетворенні теплоти в роботу. Усвідомити сутність поняття «компенсація» і залежність виду компенсації від умов перетворення теплоти в роботу, приділивши особливу увагу перетворенню в замкнених процесах – циклах. Вивчення цієї частини матеріалу має привести до розуміння сутності Другого закону термодинаміки, яка полягає в узагальненні цим законом особливостей теплоти при її передачі та перетворенні в роботу.

Вивчити основні формулювання закону і з'ясувати, в чому їх спільність. Чітко уявляти межі застосування Другого закону термодинаміки. Вивчити: класифікацію циклів за напрямком і характером процесів, що їх утворюють (прямі, зворотні, оборотні, необоротні), за характером корисного ефекту циклу; класифікацію теплових машин за їх призначенням (теплові двигуни, холодильні установки, теплові насоси); термодинамічні схеми теплових машин, в яких здійснюються найпростіші оборотні цикли. Усвідомити, що собою являє «довічний двигун другого роду». Розібратися, чому при наявності двох джерел теплоти єдиною можливим оборотним циклом є цикл Карно, як він здійснюється і зображується в T,s і p,v координатах. Уявити фізичну сутність характеристик ефективності термодинамічних циклів різних теплових машин і вивчити, як ці характеристики обчислюються в загальному випадку та для випадку оборотного циклу Карно. Звернути увагу на діапазон зміни числових значень різних характеристик (термічного ККД, холодильного коефіцієнту, опалювального коефіцієнту). Вивчити властивості оборотного циклу Карно, звернувши увагу на те, що встановлені при його розгляді положення одночасно слугують і основними положеннями Другого закону термодинаміки. Запам'ятати, що для оборотного циклу Карно $(Q_{\text{підв}} / T_{\text{підв}}) = (Q_{\text{відв}} / T_{\text{відв}})$, де $T_{\text{підв}}$ та $T_{\text{відв}}$ – абсолютні температури відповідно джерела теплоти, від якого енергія у формі теплоти підводиться до робочого тіла, і джерела теплоти, до якого енергія у формі теплоти відводиться від робочого тіла. Значення показників ефективності цього циклу найбільші в порівнянні зі значеннями їх для будь-яких інших оборотних циклів у заданому інтервалі температур джерел теплоти і не залежать від властивостей робочого тіла.

Усвідомити поняття середньої термодинамічної температури рівноважного процесу теплообміну; вивчити, як ця температура обчислюється (аналітично, графічно), і довести, що в будь-якому процесі при постійній теплоємності робочого тіла $T_m = (T_2 - T_1) / \ln(T_2/T_1)$. Усвідомити поняття еквівалентного циклу Карно для даного довільного ідеального циклу; звернути увагу на те, що ідеальний цикл будь-якої теплової машини можна замінити еквівалентним циклом Карно, і, обчисливши його ефективність, порівняти між собою за ефективністю теплові машини однакового призначення (наприклад, двигуни), робочі тіла в яких здійснюють різні цикли. Ефективність довільних

оборотних циклів обчислюється при цьому за формулами для ефективності оборотного циклу Карно, в які підставляють середні термодинамічні температури джерел теплоти.

Повторити матеріал теми «Параметри стану» в частині, що стосується параметру ентропія і математичних властивостей параметрів стану.

Слід уяснити, що внутрішня енергія ізольованої системи є величиною сталою, а вираз $\oint ds = 0$ вводить в термодинаміку принцип існування ентропії.

Вивчити загальні властивості кругових процесів, вивести самостійно вираз інтеграла Клаузіуса $\oint (\delta q/T) \leq 0$, що відображає ці властивості і одночасно є аналітичним виразом Другого закону термодинаміки для кругових процесів. Вивчити, а потім довести самостійно, що в разі розімкнутих процесів математичний вираз цього закону має вигляд $ds \geq \delta q/T$. Звернути увагу на те, що цей вираз дозволяє розкрити термодинамічну сутність ентропії як міри необоротності процесів (в оборотних процесах зведена теплота процесу дорівнює зміні ентропії, а в необоротних – менше неї). Запам'ятати, що T – абсолютна температура джерел теплоти.

У разі тільки зовнішньо необоротних процесів $\Delta s = \int_1^2 (\delta q/T_{p.t.})$ більше зведеної теплоти процесу. Тут $T_{p.t.}$ – абсолютна температура робочого тіла. У разі тільки внутрішньо необоротних процесів (процесів з тертям при $\delta q_{тр} > 0$) вважають умовно, що $\Delta s = \int_1^2 ((\delta q + \delta q_{тр})/T)$.

Вивчити, як змінюється ентропія термічно ізольованої системи при протіканні в ній різних термодинамічних процесів, і запам'ятати, що ентропія такої системи не може зменшуватися ($\Delta S_{сист} \geq 0$), але може збільшуватися, якщо в системі відбуваються незворотні процеси.

Усвідомити сутність поняття «роботоздатність термодинамічної системи» і показати, що максимальна роботоздатність системи при здійсненні робочим тілом циклічного процесу $N_{max} = Q_{підв}(1 - T_{відв}/T_{підв})$, а якщо цей процес необоротний, то роботоздатність $N = N_{max} - \Delta N$. Втрата роботоздатності внаслідок необоротності процесів $\Delta N = T_{відв} \Delta S_{сист}$, де $\Delta S_{сист} = -(Q_{підв}/T_{підв}) + (Q_{відв}/T_{відв})$. Слід звернути увагу: на знаки в останній формулі; на те, що формули для N і ΔN справедливі тільки при $Q_{підв} = idem$ в оборотному і необоротному циклах, а також на те, що від'ємне значення N свідчить про витрату зовнішньої роботи в циклі.

Усвідомити, що при оборотному протіканні процесів і $T_{відв} = T_{н.с.}$ навколишнього середовища в природних умовах поняття N_{max} ототожнюють з

поняттям «ексергія» $N_{\max} = E$, а при необоротних змінах в таких системах замість ΔN оцінюють втрати ексергії $\Delta E = T_{o.c} \Delta S_{\text{сист}}$.

Приклади

Приклад 4.1. Тепловий двигун працює за оборотним циклом Карно. Потужність двигуна 500 кВт. Від верхнього джерела теплоти до робочого тіла підводиться тепловий потік 700 кВт. Розрахувати: ефективність цього циклу Карно; кількість відведеної в циклі теплоти; температуру верхнього джерела теплоти; зміну ентропії термодинамічної системи, якщо температура нижнього джерела теплоти дорівнює 37 °С. Зобразити термодинамічну схему установки та цикл в T, s - координатах.

Розв'язання. $T_{\text{відв}} = 310$ К. Термічний ККД циклу $\eta_t = N/Q_{\text{підв}}$. Кількість відведеної в циклі теплоти $Q_{\text{відв}} = Q_{\text{підв}} - N$. Для оборотного циклу Карно $(Q_{\text{підв}}/T_{\text{підв}}) = (Q_{\text{відв}}/T_{\text{відв}})$. Звідси температура верхнього джерела теплоти $T_{\text{підв}} = T_{\text{відв}} + Q_{\text{підв}}/Q_{\text{відв}}$. Згідно з властивістю адитивності ентропії зміна ентропії системи дорівнює сумі змін ентропії її окремих частин: $\Delta S = \Delta S_{\text{ГД}} + \Delta S_{\text{РТ}} + \Delta S_{\text{ХД}} = -(Q_{\text{підв}}/Q_{\text{відв}}) + \oint dS_{\text{РТ}} + Q_{\text{відв}}/Q_{\text{підв}} = 0$, де $\oint dS = 0$ завжди. $\eta_t = 500 / 700 \approx 0,714$. $Q_{\text{відв}} = 700 - 500 = 200$ кВт; $T_{\text{підв}} = 310 \cdot 700 / 200 = 1085$ К; $\Delta S_{\text{сист}} = -700/1085 + 0 + 200/310 = 0$ кДж/К. Термодинамічна схема установки (а) та цикл в T, s - координатах (б) зображені на рис.4.1.

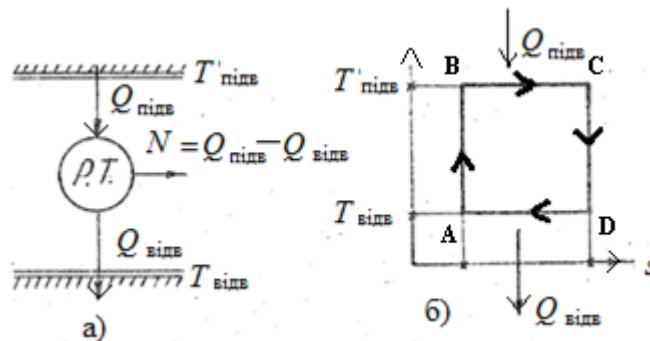


Рис.4.1. До прикладу 4.1.

Відповідь: $\eta_t \approx 0,714$; $Q_{\text{відв}} = 200$ кВт; $T_{\text{підв}} = 1085$ К; $\Delta S_{\text{сист}} = 0$.

Приклад 4.2. Холодильна установка працює по оборотному холодильному циклу Карно та використовується для охолодження води. Потужність приводу машини 10 кВт. Відвід теплоти від нижнього джерела до робочого тіла здійснюється при температурі 0 °С, а від робочого тіла до верхнього джерела – при температурі 37 °С. Розрахувати, яку кількість води можна охолодити від 25 до 5 °С в такій установці та яка кількість води повинна циркулювати в системі тепловідводу верхнього джерела теплоти, якщо вода в

ньому нагрівається від 20 до 30 °С. Прийняти теплоємність води $c = 4,19$ кДж/(кг К). Зобразити термодинамічну схему установки та цикл в T, s - координатах.

Розв'язання. Кількість охолоджуючої води $m_{\text{ох}}$ можна розрахувати з рівняння теплового балансу $Q_{\text{підв}} = m_{\text{ох}} c (t''_{\text{ох}} - t'_{\text{ох}})$. Звідси $m_{\text{ох}} = Q_{\text{підв}} / [c (t''_{\text{ох}} - t'_{\text{ох}})]$, де $Q_{\text{підв}}$ – кількість теплоти, яка підводиться від нижнього джерела теплоти до робочого тіла холодильної машини. Аналогічно кількість води, що циркулює в системі тепловідводу верхнього джерела теплоти, $m_{\text{н}} = Q_{\text{відв}} / [c (t''_{\text{н}} - t'_{\text{н}})]$, де $Q_{\text{відв}}$ – кількість теплоти, що відводиться до верхнього джерела теплоти від робочого тіла. Ефективність циклу визначається холодильним коефіцієнтом $\varepsilon = Q_{\text{підв}} / N = T_{\text{підв}} / (T_{\text{підв}} - T_{\text{відв}})$. Звідси $Q_{\text{підв}} = N T_{\text{підв}} / (T_{\text{підв}} - T_{\text{відв}})$. Величина $Q_{\text{відв}} = Q_{\text{підв}} + N$. Зауважимо, що величина N за своєю сутністю від'ємна. Отже, $Q_{\text{підв}} = 10(273/310 - 273) \approx 73,8$ кВт; $Q_{\text{відв}} = 73,8 + 10 = 83,8$ кВт; $m_{\text{ох}} = -3,8 / [4,19 (5-25)] \approx 0,88$ кг/с. Знак мінус використано тому, що кількість теплоти $Q_{\text{підв}}$ відводиться від нижнього джерела; $m_{\text{н}} = 83,8 / 4,19 \cdot (30 - 20) \approx 2$ кг/с. Термодинамічна схема установки (а) та цикл в T, s - координатах (б) зображені на рис.4.2.

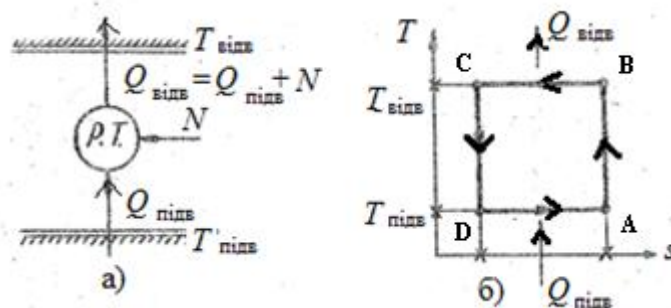


Рис.4.2. До прикладів 4.2 та 4.3

Відповідь: $m_{\text{ох}} \approx 0,88$ кг/с; $m_{\text{н}} \approx 2$ кг/с.

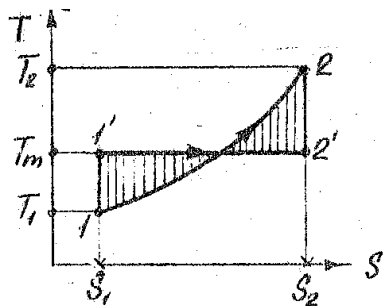
Приклад 4.3. Опалювальний тепловий насос, що працює за оборотним опалювальним циклом Карно, використовується для підтримання температури 20 °С в приміщенні з тепловтратами 10 кВт. Розрахувати: потужність двигуна, що приводить в дію компресор цієї установки; опалювальний коефіцієнт циклу; кількість теплоти, що підводиться від навколишнього повітря (джерела теплоти), яке має температуру мінус 13 °С, до робочого тіла установки. Зобразити термодинамічну схему установки та цикл в T, s - координатах.

Розв'язання. Згідно властивості оборотного циклу Карно $(Q_{\text{підв}} / T_{\text{підв}}) = (Q_{\text{відв}} / T_{\text{відв}})$. Звідси $Q_{\text{підв}} = Q_{\text{відв}} (T_{\text{підв}} / T_{\text{відв}})$. Потужність приводу установки $N = Q_{\text{відв}} - Q_{\text{підв}}$. Опалювальний коефіцієнт $\varphi = Q_{\text{відв}} / N = T_{\text{відв}} / (T_{\text{відв}} - T_{\text{підв}})$. Таким чином, $\varphi = 293 / (293 - 260) \approx 8,88$; $Q_{\text{підв}} = 10 \cdot 260 / 293 \approx 8,87$ кВт; $N = 10 - 8,87 \approx 1,13$ кВт. Відмітимо, що величина N за своєю сутністю від'ємна. Перевірка: $N = Q_{\text{відв}} / \varphi$; $N = 10 / 8,88 \approx 1,13$ кВт. Термодинамічна схема установки та цикл в T, s - координатах такі, як в прикладі 4.2.

Відповідь: $N = 1,13$ кВт; $\varphi = 8,88$; $Q_{\text{підв}} = 8,87$ кВт.

Приклад 4.4. В рівноважному процесі ізобарного нагрівання до робочого тіла підведено в формі теплоти 2400 кДж/кг, в результаті чого його температура в кінці процесу досягла 1500 К. Вважаючи питому теплоємність робочого тіла в цьому процесі рівною 2 кДж/(кг К), розрахувати середню термодинамічну температуру підводу теплоти та зміну ентропії робочого тіла в цьому процесі. Зобразити процес в T, s - координатах.

Розв'язання. В процесі $c = \text{const}$ середню термодинамічну температуру можна знайти за співвідношенням: $T_m = q / \Delta s = (T_2 - T_1) / \ln(T_2 / T_1)$. Початкову температуру процесу знаходимо з рівняння $q = c_p (T_2 - T_1)$, звідки $T_1 = T_2 - q / c_p$. Зміну ентропії в процесі визначаємо



за співвідношенням: $\Delta s = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\delta q}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p dT}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$.

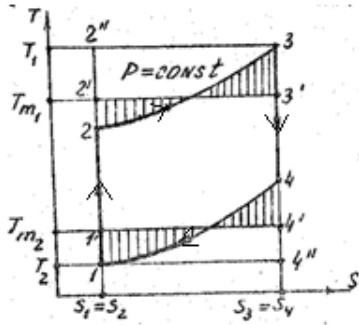
Таким чином, $T_1 = 1500 - 2400 / 2 = 300$ К; $T_m = (1500 - 300) / \ln(1500 / 300) \approx 745$ К; $\Delta s = 2 \ln(1500 / 300) \approx 3,22$ кДж/(кг К). Процес в T, s - координатах

Рис.4.3. До прикладу 4.4. зображений на рис.4.3.

Відповідь: $T_m = 745$ К; $\Delta s = 3,22$ кДж/(кг К).

Приклад 4.5. В двигуні внутрішнього згорання робоче тіло здійснює оборотний цикл Дизеля, який в T, s - координатах зображений на рис.4.4. Температури в характерних точках циклу мають значення: $t_1 = 20$ °С; $t_2 = 536$ °С; $t_3 = 1345$ °С; $t_4 = 500$ °С. Знайти термічний ККД цього циклу, використовуючи поняття еквівалентного циклу Карно, та визначити максимально можливе значення ККД в заданому інтервалі температур. Теплоємність робочого тіла в кожному процесі циклу вважати постійною величиною.

Розв'язання. Термічний ККД будь-якого оборотного циклу через ККД



еквівалентного циклу Карно розраховується за формулою $\eta_t = \eta_{t_e} = 1 - T_{m_2}/T_{m_1}$, де T_{m_2} і T_{m_1} – середні термодинамічні температури в процесах 2-3 підводу теплоти і 4-1 відводу теплоти. Ці температури визначаються за співвідношеннями: $T_{m_1} = (T_3 - T_2) / \ln(T_3 / T_2)$; $T_{m_2} = (T_4 - T_1) / \ln(T_4 / T_1)$. Еквівалентний цикл Карно зображується на рис.4.4 прямокутником

Рис.4.4. До прикладу 4.5. $1' - 2' - 3' - 4' - 1'$. Відомо, що в заданому інтервалі температур з усіх можливих циклів максимальне значення ККД має цикл Карно. Тому в інтервалі $T_1 - T_3$ маємо $\eta_{t_{\max}} = 1 - T_1/T_3$. Таким чином, $T_{m_1} = (1618 - 809) / \ln(1618/809) \approx 1167$ К; $T_{m_2} = (773 - 293) / \ln(773/293) \approx 495$ К. $\eta_t = \eta_{t_k} = 1 - 495/1167 \approx 0,576$; $\eta_{t_{\max}} = 1 - 293/1618 \approx 0,819$.

Відповідь: $\eta_t = \eta_{t_k} = 0,576$; $\eta_{t_{\max}} = 0,819$.

Приклад 4.6. Тепловий потік $Q = 1000$ кДж передається від тіла 1, що має температуру $T_1 = 800$ К, до тіла 2, що має температуру $T_2 = 700$ К. Розрахувати зміну ентропії цієї системи в результаті теплообміну за реальних умов і, припустивши, що $T_1 = T_2$. Порівняти зміну ентропії цих тіл з відповідними значеннями зведеної теплоти для обох випадків. Зобразити процес в T, s - координатах.

Розв'язання. Зміна ентропії системи, що складається з двох тіл, згідно властивості адитивності ентропії $\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_1 + \Delta S_2$, де $\Delta S_1 = -Q/T_1$ і $\Delta S_2 = Q/T_2$. Знак мінус враховує, що теплота відводиться від тіла 1. Отже, $\Delta S_{\text{сист}} = Q(1/T_2 - 1/T_1)$. Так як $T_1 > T_2$, то $\Delta S_{\text{сист}} > 0$. При $T_1 = T_2$, $\Delta S_{\text{сист}} = 0$. Зведе-



на теплота тіла 1: $Q_1^{\text{ЗВ}} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_{\text{сист}}}$. Так як для тіла 1 джерелом слугує тіло 2, то $Q_1^{\text{ЗВ}} = -Q/T_2$. Аналогічно для

тіла 2: $Q_2^{\text{ЗВ}} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T_{\text{сист}}} = \frac{Q}{T_1}$. Звідси випливає, що при $T_1 >$

T_2 буде: $\Delta S_1 = -Q/T_1 > Q_1^{\text{ЗВ}} = -Q/T_2$; $\Delta S_2 = Q/T_2 > Q_2^{\text{ЗВ}} = Q/T_1$; $\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -(Q_1^{\text{ЗВ}} + Q_2^{\text{ЗВ}})$. При $T_1 = T_2$, тобто для випадку оборотного процесу теплообміну, $\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = Q_1^{\text{ЗВ}} + Q_2^{\text{ЗВ}} = 0$. Отже, $\Delta S_{\text{сист}} = 1000(1/700 - 1/800) \approx 0,178$ кДж/К > 0 . $\Delta S_1 = -(1000/800) = -1,25$ кДж/К; $\Delta S_2 = 1000/700 = 1,428$ кДж/К; $Q_1^{\text{ЗВ}} = -(1000/700) = -1,428$ кДж/К; $Q_2^{\text{ЗВ}} = 1000/800 = 1,25$ кДж/К. Відмітимо, що з двох від'ємних чисел більше те, яке за

абсолютним значенням менше. Схема процесів в T, s - координатах зображена на рис. 4.5.

Відповідь: $\Delta S_{\text{сист}} = 0,178 \text{ кДж/К}$; $\Delta S_1 = -1,25 \text{ кДж/К}$; $\Delta S_2 = 1,428 \text{ кДж/К}$.

Приклад 4.7. Робоче тіло теплового двигуна здійснює цикл Карно, отримуючи від верхнього джерела теплоти тепловий потік 130 кДж та віддаючи нижньому джерелу теплоти тепловий потік 50 кДж . При цьому ентропія нижнього джерела змінюється на $0,166 \text{ кДж/К}$. Відвід теплоти до нижнього джерела відбувається необоротно, що викликано кінцевою різницею температур $\Delta T = 50 \text{ К}$ між температурами робочого тіла і нижнього джерела теплоти. Визначити корисну потужність установки, термічний ККД циклу, зміну ентропії системи, зменшення роботоздатності системи та температури джерел теплоти. Зобразити схему процесів в T, s - координатах.

Розв'язання. Корисна потужність установки $N = Q_1 - Q_2$; $N = 130 - 50 = 80 \text{ кДж}$. Термічний ККД циклу $\eta_{\text{тк}} = N/Q_1$; $\eta_{\text{тк}} = 80/130 = 0,615$. Зміна ентропії системи $\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_{\text{г}} + \Delta S_{\text{рт}} + \Delta S_{\text{х}}$. Зміна ентропії робочого тіла в круговому процесі $\Delta S_{\text{рт}} = 0$. Зміна ентропії гарячого джерела теплоти $\Delta S_{\text{г}} = -Q_1/T_{\text{г}}$. Визначимо температуру $T_{\text{г}}$ гарячого джерела теплоти. Так як цикл внутрішньо оборотний, то $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$, де $T_1 = T_{\text{г}}$ і $T_2 = T_{\text{х}} + 50$. Так як $T_{\text{х}} = Q_2/\Delta S_{\text{х}}$, то $T_{\text{г}} = (Q_2/\Delta S_{\text{х}} + 50)Q_1/Q_2$; $T_{\text{х}} = 50/0,166 = 301 \text{ К}$; $T_{\text{г}} = (301+50)/(130/50) = 913 \text{ К}$; $\Delta S_{\text{г}} = -130/913 = -0,142 \text{ кДж/К}$; $\Delta S_{\text{сист}} = -0,142 + 0 + 0,166 = 0,024 \text{ кДж/К}$.

Якби в нижньому джерелі теплоти була відсутня необоротність, то при одному й тому ж значенні $Q_1 = \text{idem}$ корисна потужність установки була б максимальною $N_{\text{max}} = N + \Delta N$, де $\Delta N = T_{\text{х}} \Delta S_{\text{сист}}$ – зменшення роботоздатності системи; $\Delta N = 301 \cdot 0,024 = 7,22 \text{ кВт}$; $N_{\text{max}} = 80 + 7,22 = 87,22 \text{ кВт}$.

З іншого боку, $N_{\text{max}} = Q_1(1 - T_{\text{х}}/T_{\text{г}}) = 130(1 - 301/913) = 87,14 \text{ кВт}$, тобто розрахунок виконаний правильно. Схема процесів в T, s - координатах зображена на рис.4.6.

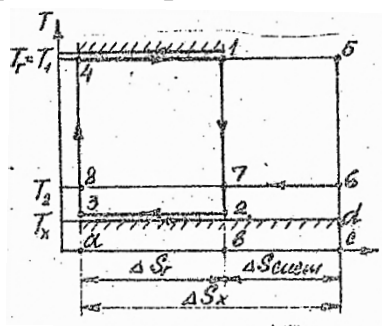


Рис.4.6. До прикладу 4.7.

$$N_{\text{max}} = \text{площа } 12341$$

$$N = \text{площа } 17841$$

$$\Delta N = \text{площа } 2dсв2$$

$$Q_1 = \text{площа } 1вa41 = \text{idem}$$

$$Q_2 = \text{площа } 3dсa3$$

Відповідь: $N = 80 \text{ кВт}$; $\eta_{\text{т}} = 0,615$; $\Delta S_{\text{сист}} = 0,024 \text{ кДж/К}$; $\Delta N = 7,22 \text{ кВт}$;

$T_{\text{г}} = 913 \text{ К}$; $T_{\text{х}} = 301 \text{ К}$.

Розв'язання. Потужність, що витрачається на привод холодильної установки, $N = Q_1 - Q_2 = T_{\Gamma} \Delta S_{\Gamma} - Q_2$. За умовою $\Delta S_{\Gamma} = |\Delta S_X| + \Delta S_{\text{сист}} = 1,15 |\Delta S_X|$. Так як $\Delta S_X = -Q_2/T_X$, то $N = Q_2(1,15(T_{\Gamma}/T_X) - 1)$. Втрата потужності, що пов'язана з необоротністю процесу стиснення, $\Delta N = N - N_{\min}$, де $N_{\min} = Q_2/\varepsilon_K$ витрата потужності на привод установки, що працює за оборотним циклом Карно; $\varepsilon_K = T_X/(T_{\Gamma} - T_X)$ – холодильний коефіцієнт оборотного циклу Карно. Таким чином, $N_{\min} = Q_2(T_{\Gamma}/T_X - 1)$ і $\Delta N = 0,15 Q_2 T_{\Gamma}/T_X$. З іншого боку, $\Delta N = T_{\Gamma} \Delta S_{\text{сист}}$, де зміна ентропії системи $\Delta S_{\text{сист}} = \Delta S_X + \Delta S_{\text{рТ}} + \Delta S_{\Gamma} = -Q_2/T_X + 0 + 1,15 Q_2/T_X = 0,15 Q_2/T_X$. Холодильний коефіцієнт циклу з необоротністю $\varepsilon = Q_2/N$. Підставляючи в формули числові значення величин, отримуємо $N = 50(1,15 \cdot 303/263 - 1) = 16,2 \text{ кВт}$; $\Delta N = 0,15 \cdot 50 \cdot 303 / 263 = 8,6 \text{ кВт}$; $\Delta S_{\text{сист}} = 0,15 \cdot 50/263 = 0,0285 \text{ кВт/К}$; $\varepsilon = 50/16,2 \approx 3,1$.

Рис.4.7. До прикладу 4.8. стиснення, дорівнює площі 51ac5. Q_2 = площа
4a634 = idem.

Відповідь: $N = 16,2$ кВТ; $\Delta N = 8,6$ кВТ; $\Delta S_{\text{снст}} = 0,0285$ кВТ/К; $\varepsilon = 3,1$

Задача 4.1. Визначити термічний ККД оборотного циклу Карно, за яким працює двигун потужністю 50 кВт, температуру верхнього джерела те-

плоти та теплові потоки джерел теплоти, якщо температура нижнього джерела теплоти $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, а зміна його ентропії дорівнює $0,2\text{ кВт/К}$.

Відповідь: $\eta_{\text{тк}} = 0,454$; $Q_1 = 110\text{ кВт}$; $Q_2 = 60\text{ кВт}$; $T_1 = 549\text{ К}$.

Задача 4.2. Холодильна установка, що працює за оборотним циклом Карно, споживає для свого приводу потужність 50 кВт . Холодильний коефіцієнт циклу дорівнює 3 . Температура верхнього джерела теплоти $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а зміна ентропії джерела теплоти складає $0,66\text{ кВт/К}$. Визначити температуру нижнього джерела теплоти та холодопродуктивність установки.

Відповідь: $T_x = 227\text{ К}$; $Q_x = 150\text{ кВт}$.

Задача 4.3. Опалювальна установка працює за оборотним циклом Карно теплового насосу та підтримує температуру $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в приміщенні з тепловтратами 10 кВт . Нижнім джерелом теплоти слугує водойма, температура води в якій $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити потужність приводу установки, що забезпечує задану опалювальну потужність установки, кількість теплоти, що відводиться від нижнього джерела та опалювальний коефіцієнт циклу.

Відповідь: $\phi = 10,3$; $N = 0,97\text{ кВт}$; $Q_o = 9,03\text{ кВт}$.

Задача 4.4. Визначити середню термодинамічну температуру процесу ізобарного охолодження газу та зміну ентропії газу в цьому процесі, якщо відводиться 20 МДж теплоти, а температура 10 кг газу в кінці процесу $77\text{ }^{\circ}\text{C}$. Питома теплоємність газу постійна і дорівнює 1 кДж/(кг К) . Зобразити процес в T, s - координатах.

Відповідь: $T_m = 1050\text{ К}$; $\Delta s = -1,904\text{ кДж/(кг К)}$.

Задача 4.5. Користуючись поняттям еквівалентного циклу Карно, визначити холодильний коефіцієнт оборотного циклу повітряної холодильної установки, який утворений двома адіабатами та двома довільними процесами підводу та відводу теплоти при постійній теплоємності робочого тіла, якщо відомо, що $t_1 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_3 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_4 = -77\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зобразити процес в T, s - координатах.

Відповідь: $\varepsilon = 2,03$.

Задача 4.6. Температура тіла 1 в результаті теплообміну з тілом 2 зменшилася від $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура тіла 2 при цьому збільшилася від $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $360\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити зміну ентропії системи та зведену теплоту обох тіл, якщо теплоємність тіла 1 дорівнює 20 кДж/К . Чому дорівнює теплоємність тіла 2? Зобразіть процес в T, s - координатах.

Відповідь: $\Delta S_{\text{сист}} = 28,5 \text{ кДж/К}$; $Q_{\text{зв1}} = -42,36 \text{ кДж/К}$; $Q_{\text{зв2}} = 13,86 \text{ кДж/К}$; $C_2 = 50 \text{ кДж/К}$.

Задача 4.7. Холодильна установка, що працює за циклом Карно, має холодопродуктивність 10 кВт. Температура джерел теплоти дорівнює -20°C і $+20^\circ\text{C}$. В верхньому джерелі спостерігається необоротність, що викликана кінцевою різницею температур в процесі теплообміну між робочим тілом та джерелом теплоти, яка становить 10°C . Визначити холодильний коефіцієнт циклу, витрату потужності на привод установки, втрату потужності, що пов'язана з необоротністю процесу теплообміну, та зміну ентропії системи. Зобразити схему процесу в T, s - координатах.

Відповідь: $\varepsilon = 5,06$; $N \approx 1,98 \text{ кВт}$; $\Delta N = 0,395 \text{ кВт}$; $\Delta S_{\text{сист}} = 0,00136 \text{ кВт/К}$.

Задача 4.8. Тепловий двигун працює за циклом Карно при температурах джерел теплоти 300 К і 1000 К. Цикл необоротний через тертя при адіабатному розширенні робочого тіла. Зміна ентропії робочого тіла при розширенні складає 20 % зміни ентропії в процесі ізотермічного підводу теплоти в кількості 50 кВт. Визначити термічний ККД циклу, потужність двигуна, втрату потужності, що викликана необоротністю циклу, та зміну ентропії системи. Зобразити схему процесів в T, s - координатах.

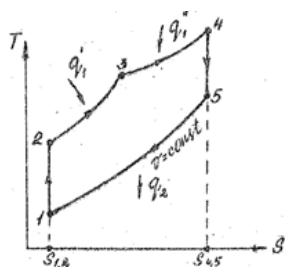
Відповідь: $\eta_t = 0,64$; $N = 32 \text{ кВт}$; $\Delta N = 3 \text{ кВт}$; $\Delta S_{\text{сист}} = 0,01 \text{ кВт/К}$.

Задача 4.9. Вибрати з табл.П.2.3 додатку дані, що відповідають варіанту завдання, та розрахувати на їх основі решту величин, що наведені в заголовку таблиці, для оборотного циклу Карно теплового двигуна.

Задача 4.10. Вибрати з табл.П.2.4 додатку дані, що відповідають варіанту завдання, та розрахувати на їх основі решту величин, що наведені в заголовку таблиці, для оборотного циклу Карно холодильної установки.

Задача 4.11. Вибрати з табл. П.2.5 додатку дані, що відповідають варіанту завдання, та розрахувати на їх основі решту величин, що наведені в заголовку таблиці, для оборотного циклу Карно опалювального теплового насоса.

Задача 4.12. В тепловому двигуні робоче тіло здійснює цикл, зображений на рис.4.8. Підвід теплоти в циклі здійснюється в ізобарному 3-4 та ізохорному 2-3 процесах, відвід теплоти – в ізобарному процесі 5-1. Температура робочого тіла в характерних точках $t_1 = 30^\circ\text{C}$; $t_2 = 387^\circ\text{C}$; $t_3 = 1047^\circ\text{C}$; $t_4 = 1311^\circ\text{C}$; $t_5 = 511^\circ\text{C}$.



Користуючись поняттям еквівалентного циклу Карно, розрахувати термічний ККД цього циклу, вважаючи питому теплоємність робочого тіла постійною:
 $c_p = 1 \text{ кДж/(кг К)}$; $c_v = 0,72 \text{ кДж/(кг К)}$.

Рис. 4.8. До задачі 4.12.

Відповідь: $\eta_t = 0,53$; $t_{m1} = 1080 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{m2} = 506 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 4.13. Робоче тіло, що має постійну температуру $27 \text{ }^\circ\text{C}$, отримує 3000 кДж теплоти від джерела, температура якого змінюється в процесі теплообміну від $327 \text{ }^\circ\text{C}$ до $127 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплоємність робочого тіла в цьому процесі $c = \text{const}$. Процес внутрішньо необоротний через тертя, причому теплота тертя складає 10% теплового потоку, що отримує тіло. Розрахувати зміну ентропії системи та робочого тіла, а також зведену теплоту тіла. Дати графічну інтерпретацію рішення в T, s - координатах.

Відповідь: $\Delta S_{\text{сист}} = 4,9 \text{ кДж/К}$; $\Delta S_{\text{РТ}} = 11 \text{ кДж/К}$; $Q_{\text{зв}} = 6,69 \text{ кДж/кг}$.

Задача 4.14. В тепловому двигуні робоче тіло здійснює цикл Карно, в якому теплота підводиться при кінцевій різниці температур між джерелом теплоти та робочим тілом, а розширення робочого тіла в адіабатному процесі – супроводжується тертям. Температури джерел теплоти дорівнюють $27 \text{ }^\circ\text{C}$ і $727 \text{ }^\circ\text{C}$, різниця температур робочого тіла та верхнього джерела теплоти дорівнює $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Зростання ентропії робочого тіла в адіабатному процесі розширення у зв'язку з його необоротністю дорівнює 10% зміни ентропії в процесі підводу теплоти при кінцевій різниці температур. Від верхнього джерела теплоти до робочого тіла підводиться тепловий потік $Q_1 = 10 \text{ кВт}$. Визначити потужність двигуна, його термічний ККД та енергетичні втрати, що спричинені необоротністю в процесах теплообміну та розширення. Пояснити розв'язання за допомогою зображення процесів в T, s - координатах.

Відповідь: $N = 6,34 \text{ кВт}$; $\eta_t = 0,634$; $\Delta N = 0,66 \text{ кВт}$.

2.5. ВЛАСТИВОСТІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ І АНАЛІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Мета – поглибити знання про властивості ідеальних газів, сформува-ти вміння розраховувати процеси зміни стану ідеальних газів.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Необхідно знати: закон Авогадро та наслідки з нього: що таке універсальна газова стала і газова стала для одного кілограма газу; рівняння стану ідеального газу в формах Авогадро - Клапейрона, Клапейрона і Менделєєва - Клапейрона; як обчислюють теплоємність ідеального газу на підставі молекулярно-кінетичної теорії будови газу, закон Джоуля і формулу Майера; як обчислюють кількість теплоти, підведеної (відведеної) до газу, на підставі табличних даних про теплоємність газу; як обчислюють калоричні параметри – внутрішню енергію, ентальпію, ентропію – ідеальних газів; способи за-вдання складу суміші ідеальних газів, поняття парціальних тисків та об'ємів, закони Дальтона і Амага; як обчислюють: газову сталу для одного кілограма суміші, молекулярну масу, теплоємність, внутрішню енергію, ентальпію, ен-тропію суміші, парціальні тиск і об'єм компонентів суміші; методику і послі-довність аналізу термодинамічних процесів ідеального газу; рівняння основ-них процесів і формули співвідношення параметрів для цих процесів; як об-числюють теплоємність політропного процесу.

Рекомендована література: [1.1], [1.2], [1.4], [3.1], [3.2].

Рекомендації до вивчення матеріалу по темі

Необхідно усвідомити поняття «ідеальний газ» і практичну значимість введення цієї термодинамічної абстракції. Звернути увагу на те, що робочі тіла діляться на ідеальні та реальні гази за характерними особливостями можливих термодинамічних станів цих тіл і особливостями поведінки їх в тер-модинамічних процесах. Чіткої межі між ідеальним і реальним газом немає. Будь-який газ можна вважати ідеальним, якщо в області станів, що розгляда-ється, він підпорядковується законам ідеального газу. На практиці як ідеальні поведуться гази при низьких тисках і температурах, далеких від температури конденсації цих газів.

Потім слід вивчити математичний висновок і зміст закону Авогадро, ус-відомити поняття кіломоля речовини. Вивести математично і усвідомити два наслідки цього закону. Розібратися і вивчити, як можна обчислити питомий

об'єм і густину будь-якого газу за нормальних умов, його універсальну і питому (для одного кілограма) газові сталі, звернувши увагу на одиниці цих величин. Запам'ятати, що $R_u = 8314$ Дж / (кмоль К). Вивчити різні форми (для одного кілограма, кіломоля і всієї маси газу) рівняння стану ідеального газу.

Слід запам'ятати, що теплоємність – одна з основних характеристик, які дозволяють обчислити кількість теплоти в процесі, тобто вирішити найважливіше завдання теплотехніки. Необхідно повторити матеріал теми 2.2, який відноситься до поняття теплоємності, з'ясувавши, що з визначення теплоємності $C_x = (\delta Q / dT)_x$ в процесі з постійним параметром $X = \text{const}$ випливає, що C_x – функція процесу. У загальному випадку відношення нескінченно малої кількості теплоти δQ до приросту температури dT не можна ототожнювати з математичним поняттям похідної. Найбільш важливе значення при розрахунках мають теплоємності C_p в процесі при $p = \text{const}$ та C_v в процесі при $v = \text{const}$, значення яких пов'язані між собою рівнянням Р.Майєра. Слід розібратися в тому, як обчислюються C_v і C_p на підставі молекулярно-кінетичної теорії будови газів і чому згідно з цією теорією теплоємність не залежить від температури. Бажано запам'ятати значення мольних теплоємностей c_{mv} і c_{mp} для газів різної атомності, які дозволяють обчислити значення питомої масової та об'ємної теплоємностей газів. Слід пам'ятати, що теплоємність газів можна вважати постійною тільки у вузькому інтервалі температур. Для широкого інтервалу необхідно враховувати залежність теплоємності від температури. Зазначимо, що теплоємність, внутрішня енергія та ентальпія реальних газів залежить не лише від температури газів, але і від тисків, під яким знаходиться газ. З метою спрощення розрахунків вводять поняття середньої в інтервалі температур теплоємності. Необхідно усвідомити, який зв'язок існує між істиною і середньою теплоємностями, як розраховується кількість теплоти з урахуванням залежності теплоємності від температури, як користуватися таблицями середніх теплоємностей газів.

Вивчаючи властивості калоричних параметрів ідеального газу, слід звернути увагу на те, що в загальному випадку внутрішня енергія і ентальпія газу – функції його стану і $c_v = (\partial u / dT)_v$, а $c_p = (\partial h / dT)_p$. Згідно з молекулярно-кінетичною теорією, внутрішня енергія та ентальпія ідеального газу залежать тільки від температури, і в цьому окремому випадку $c_v = du / dT$ і $c_p = dh / dT$. Тому у всіх процесах з ідеальними газами $du = c_v dT$ і $dh = c_p dT$.

Вивчаючи властивості газових сумішей, слід розібратися зі способами завдання складу суміші, усвідомити уявлення про відносну масову, об'ємну і мольну складові суміші; запам'ятати, що кожен компонент суміші займає весь об'єм посудини, в якій знаходиться суміш, при своєму парціальному тиску. Усвідомити, що таке парціальний тиск компонента і зміст закону Даль-

тона, поняття зведеного (парціального) об'єму компонента і в чому полягає зміст закону Амага. Потім вивчити, як перейти від одного способу завдання складу суміші до іншого (таблиця П.1.12 додатків). Запам'ятати, що до суміші ідеальних газів може бути застосовано рівняння стану ідеального газу в усіх його формах, і, використовуючи цю обставину та поняття парціальних тисків та об'ємів, вивчити, як обчислюється газова стала для 1 кг суміші і уявна молекулярна маса суміші. Використовуючи властивість адитивності калоричних параметрів і теплоємності, вивчити, як обчислюються ці величини для суміші за відомими даними для кожного компонента. Слід вивчити також, як обчислюються парціальні об'єми і тиск компонентів суміші.

При вивченні основних термодинамічних процесів слід запам'ятати визначення кожного з них, звернувши увагу на те, що в адіабатних процесах одночасно $q = 0$ і $\delta q = 0$. Потім, для випадку $c = \text{const}$ навчитися виводити рівняння процесів шляхом підстановки в рівняння Першого закону термодинаміки відповідного значення δq і значення dT із рівняння стану ідеального газу, а також формули співвідношення між параметрами для обчислення кількості теплоти і роботи процесу та зміни калоричних параметрів газу в процесі. Звернути увагу на те, що ці формули справедливі для рівноважних процесів. Слід розібратися з характерними особливостями найпростіших процесів зміни стану ідеального газу, звернувши увагу на те, що в ізотермічному процесі зміна внутрішньої енергії газу дорівнює нулю, а теплоємність газу дорівнює нескінченності. В адіабатному процесі робота розширення відбувається тільки за рахунок зменшення внутрішньої енергії, теплоємність газу дорівнює нулю. Рівняння адіабати має вигляд $p v^k = \text{const}$ тільки при $k = c_p / c_v = \text{const}$.

Необхідно навчитися правильно зображати графіки процесів в p, v - , T, s - і h, s - координатах, звернувши увагу на взаємне розташування ізотерми і адіабати, що проходять через будь-яку точку p, v - координат, та ізохори і адіабати в T, s - і h, s - координатах. Треба вміти пояснити фізичний зміст цієї особливості графіків зазначених процесів.

Слід повторити частину матеріалів розділу 2.3, яка стосується побудови схем енергобалансів процесів.

Потім слід розібратися, як розраховують адіабатний процес за допомогою таблиць термодинамічних функцій газу при $k = \text{var}$. Нехтування залежністю k від температури може призвести до значних помилок.

Вивчаючи політропні процеси, необхідно запам'ятати, що політропним буде будь-який процес, теплоємність газу в якому $c = \text{const}$. У цьому плані ізобарний, ізохорний, ізотермічний та адіабатний процеси з постійною теплоємністю газу будуть окремими випадками політропного процесу. Слід навчи-

тися виводити рівняння цього процесу $pv^n = \text{const}$, формули співвідношення між параметрами, формули для обчислення роботи, теплоти процесу та зміни калоричних параметрів газу. Надаючи різні конкретні числові значення n в інтервалі від $-\infty$ до $+\infty$, слід проаналізувати безліч можливих політропних процесів і переконатися, що в залежності від енергетичних особливостей цих процесів (в залежності від $\phi = \Delta u/q = (n-1)/(n-k) = \text{const}$) їх всі можна розділити на три характерних групи. До першої групи відносять процеси зі значеннями показника політропи від мінус $\infty < n < 1$; до другої групи належать процеси при $1 < n < k$; і до третьої групи – процеси з показником політропи $k < n < +\infty$ (табл. П1.14 додатків) Розібратися із зображенням цих трьох груп процесів у вигляді сімейства політроп, що проходять через одну точку, в p , V -та T , s - координатах. З'ясувати, які з політропних процесів зустрічаються найбільш часто на практиці.

Одне з визначень політропного процесу таке: $\alpha = \Delta u / q = \text{const}$. З умови $\alpha = \text{const}$ витікає рівність $n = \text{const}$ і $c_n = \text{const}$, де c_n – питома теплоємність політропного процесу. Таким чином, кожен з цих виразів може слугувати визначенням політропного процесу, а сам цей процес має узагальнююче значення для розглянутих процесів, якщо теплоємність в цих процесах постійна (стала).

На закінчення необхідно розглянути особливості теплоємності політропних процесів, проаналізувавши формулу $\tilde{n}_n = \tilde{n}_v [(n-k)/(n-1)]$, графік залежності $c_n = c(n)$ і встановивши умови, що визначають знак питомої теплоємності.

Питання для самоконтролю знань

1. Визначте поняття «ідеальний газ» і поясніть практичний сенс ведення цього поняття.
2. Сформулюйте закон Авогадро і практично важливі наслідки з нього.
3. Визначте поняття: «нормальні фізичні умови», «нормальний метр кубічний газу», «кіломоль ідеального газу». Який об'єм займає кіломоль ідеального газу за нормальних фізичних умов?
4. Дотримання яких умов забезпечує здійснення оборотності (можливості проведення в двох протилежних напрямках) термодинамічних процесів?
5. Назвіть різновиди рівняння стану ідеального газу. Запишіть це рівняння в різних формах (для 1 кілограма, 1 кіломоля і довільної кількості газу) і вкажіть одиниці (в СІ) величин, що входять в нього.
6. Визначте поняття «універсальна газова стала». Яке її числове значення в одиницях СІ і як вона може бути обчислена?

7. Визначте поняття «газова стала для 1 кг газу». Як вона може бути обчислена? Її фізичний зміст.
8. Визначте поняття «теплоємність робочого тіла в даному процесі». Які теплоємності розрізняють, до яких кількостей речовини їх відносять і які співвідношення пов'язують між собою значення різних теплоємностей?
9. У чому сутність молекулярно-кінетичної теорії теплоємності? Які значення для теплоємностей вона дає? Поясніть зв'язок між теплоємностями c_p і c_v .
10. Поясніть зв'язок між істиною і середньою теплоємностями? Як обчислюється кількість теплоти в процесі через істину і середню теплоємності?
11. Особливості внутрішньої енергії та ентальпії ідеального газу. Як обчислюються зміни цих величин?
12. Способи завдання складу суміші ідеальних газів. Як перейти від одного способу завдання складу суміші до іншого?
13. Визначте поняття: «парціальний тиск», «парціальний об'єм» компонента газової суміші. Сформулюйте закони Дальтона і Амага для суміші.
14. Як обчислити газову сталу для суміші, уявну молекулярну масу, густину, теплоємність, калоричні параметри суміші, парціальні тиски і об'єми її компонентів?
15. Визначте основні термодинамічні процеси, запишіть рівняння цих процесів і покажіть ці процеси в p , v -, T , s - і h , s - координатах.
16. Запишіть розрахункові формули для обчислення кількості теплоти, роботи і вимірювання калоричних параметрів в основних процесах зміни стану ідеальних газів.
17. Як розрахувати адіабатний процес при змінному значенні k ?
18. Дайте визначення політропного процесу. В якому випадку окремі процеси зміни стану ідеального газу ($p = \text{const}$; $v = \text{const}$; $T = \text{const}$; адіабатний) будуть політропними і які значення n в цих процесах?
19. Що є спільного в кожній групі політропних процесів розширювання, в яких: а) $-\infty < n < 1$; б) $1 < n < k$; в) $\infty > n > k$?
20. В якому з політропних процесів, при $n = -3$ чи $n = 4$, теплоємність процесу буде більшою?
21. Запишіть формули для обчислення кількості теплоти, роботи і зміни калоричних параметрів газу в політропному процесі.
22. У яких межах змінюється теплоємність газу в політропних процесах? Зобразіть графік зміни теплоємності в залежності від показника політропи.
23. В яких випадках при розширенні газу: а) температура його зменшується, а при стисканні збільшується? б) температура його зростає, а при стисканні зменшується?

Приклади

Приклад 5.1. Для роботи з пневматичним інструментом в ресивері об'ємом 20 м^3 накопичене стиснуте повітря. Тиск повітря в ресивері за манометром дорівнює 1 МПа при температурі 25°C та барометричному тиску 750 мм рт. ст. Після використання частини повітря тиск в ресивері за манометром дорівнює $0,1 \text{ МПа}$ при температурі 15°C . Скільки повітря використано, якщо барометричний тиск не змінився?

Розв'язання. Кількість використаного повітря дорівнює різниці мас повітря в ресивері в початковому та кінцевому станах $\Delta m = m_1 - m_2$. Маса повітря може бути визначена з рівняння Менделєєва – Клапейрона: $pV = TR_\mu/\mu$, де $\mu = 28,97 \text{ кг/моль}$ для повітря; $p = B + p_{\text{надл.}}$ – абсолютний тиск повітря в ресивері; $R_\mu = 8314 \text{ Дж/(кмоль К)}$ – універсальна газова стала; μ – відносна молекулярна маса. При $m_1 = (B + p_{\text{надл1}})V_\mu / (R_\mu T_1)$ і $m_2 = (B + p_{\text{надл2}})V_\mu / (R_\mu T_2)$ отримуємо: $\Delta m = V_\mu / R_\mu ((B + p_{\text{надл1}})/T_1 - (B + p_{\text{надл2}})/T_2)$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $\Delta m = 20 \cdot 28,97 / 8314 ((0,1 + 1) / 298 - (0,1 + 0,1) / 288)10^6 = 209 \text{ кг}$.

Відповідь: $\Delta m = 209 \text{ кг}$.

Приклад 5.2. Розрахувати кількість теплоти, що необхідна для нагрівання від 20°C до 1000°C відповідно одного кубометру (зведеного до нормальних умов) і одного кілограму повітря в ізобарному та ізохорному процесах, вважаючи, що його теплоємність: а) залежить від температури; б) не залежить (використовуючи табл. П.1.7, П.1.8, П.1.9, П.1.10 додатків).

Розв'язання. *Випадок 1.* Повітря – двоатомний газ. Згідно з молекулярно-кінетичною теорією, теплоємність такого газу $\tilde{n}_\delta = \tilde{n}_{\mu\delta}/\mu$; $\tilde{n}_v = \tilde{n}_{\mu v}/\mu$; $\tilde{n}'_\delta = \tilde{n}_{\mu\delta}/\nu_{\mu,\delta}$; $\tilde{n}'_v = \tilde{n}_{\mu v}/\nu_{\mu,v}$, де $\tilde{n}_{\mu\delta}$ і $\tilde{n}_{\mu v}$ – мольні відповідно ізобарна та ізохорна теплоємності двоатомних ідеальних газів: $V_\mu^\circ = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ – об'єм одного кіломоля ідеального газу за нормальних умов. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $c_p = 1,01 \text{ кДж/(кг К)}$; $c_v = 0,72 \text{ кДж/(кг К)}$; $c'_p = 1,308 \text{ кДж/(м}^3 \text{ К)}$; $c'_v = 0,93 \text{ кДж/(м}^3 \text{ К)}$. Кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання заданої кількості повітря, розраховуємо за формулами: $Q_p = mc_p(t_2 - t_1)$; $Q_v = mc_v(t_2 - t_1)$; $Q'_p = V_{\text{іо}}\tilde{n}'_p(t_2 - t_1)$; $Q'_v = V_{\text{ну}}\tilde{n}'_v(t_2 - t_1)$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $Q_p = 1 \cdot 1,01(1000 - 20) = 990 \text{ кДж}$; $Q_v = 1 \cdot 0,72(1000 - 20) = 705 \text{ кДж}$; $Q'_p = 1 \cdot 1,308(1000 - 20) = 1282 \text{ кДж}$; $Q'_v = 1 \cdot 0,93 \cdot (1000 - 20) = 911 \text{ кДж}$.

Випадок 2. Якщо теплоємність залежить від температури, то кількості теплоти розраховують за формулами: $Q_{pm} = m(c_{pm} \Big|_0^{t_2} - c_{pm} \Big|_0^{t_1})$; $Q_{vm} = m(\tilde{n}_{vm} \Big|_0^{t_2} - \tilde{n}_{vm} \Big|_0^{t_1})$; $Q'_{pm} = V_{i\phi}(c'_{pm} \Big|_0^{t_2} - c'_{pm} \Big|_0^{t_1})$; $Q'_{vm} = V_{i\phi}(c'_{vm} \Big|_0^{t_2} - c'_{vm} \Big|_0^{t_1})$; де $c_{pm} \Big|_0^t$, $c_{vm} \Big|_0^t$, $c'_{pm} \Big|_0^t$, $c'_{vm} \Big|_0^t$ – середні в інтервалі температур від 0 до t питомі теплоємності відповідно масова ізобарна, масова ізохорна, об'ємна ізобарна, об'ємна ізохорна, визначаються за табл. П.1.7, П.1.8 додатків. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $Q_{pm} = 1(1,0907 \cdot 1000 - 1,0036 \cdot 20) = 1070$ кДж; $Q_{vm} = 1(0,8039 \cdot 1000 - 0,7164 \cdot 20) = 790$ кДж; $Q'_{pm} = 1(1,4097 \cdot 1000 - 1,2971 \cdot 20) = 1384$ кДж; $Q'_{vm} = 1(1,0387 \cdot 1000 - 0,9261 \cdot 20) = 1020$ кДж.

Відповідь: $Q_p = 990$ кДж; $Q_v = 705$ кДж; $Q'_p = 1282$ кДж; $Q'_v = 911$ кДж;

$Q_{pm} = 1070$ кДж; $Q_{vm} = 790$ кДж; $Q'_{pm} = 1384$ кДж; $Q'_{vm} = 1020$ кДж.

Приклад 5.3 Для умов прикладу 5.2 розрахувати зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії повітря.

Розв'язання. Згідно з Першим законом термодинаміки $Q = \Delta U + L = \Delta H + L_p$, де L і L_p – відповідно термодинамічна та наявна роботи; ΔU і ΔH – зміни внутрішньої енергії та ентальпії при $V = \text{const}$, $L = 0$ та $\Delta U = Q_v$, а при $p = \text{const}$, $L_p = 0$ і $\Delta H = Q_p$. Відповідно зміна ентропії: $\Delta S_v = m c_v \ln(T_1/T_2)$; $\Delta S'_v = V_{\text{н}} c'_v \ln(T_1/T_2)$; $\Delta S_p = m c_p \ln(T_1/T_2)$; $\Delta S'_p = V_{\text{н}} c'_p \ln(T_1/T_2)$ при незалежній від температури теплоємності повітря. Якщо теплоємність залежить від температури, то в розрахункові формули для ΔS необхідно підставляти середні в інтервалі температур від T_1 до T_2 значення відповідних теплоємностей. Ці значення можна розрахувати на основі середніх значень, з таблиць П.1.7, П.1.8, П.1.9 додатків за співвідношенням: $\tilde{n}_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \left(\tilde{n}_m \Big|_0^{t_2} - \tilde{n}_m \Big|_0^{t_1} \right) / (t_2 - t_1)$.

Підставляючи числові значення величин, отримуємо для зміни ентропії при незалежній від температури теплоємності, кДж/К: $\Delta s_p = 1 \cdot 1,01 \cdot \ln \frac{1273}{293} \approx 1,48$; $\Delta s_v = 1 \cdot 0,72 \ln(1273/293) \approx 1,06$; $\Delta s'_p = 1 \cdot 1,038 \ln \frac{1273}{293} \approx 1,92$; $\Delta s'_v =$

$= 1 \cdot 0,93 \cdot \ln(1273/293) \approx 1,37$. Розраховуємо середні в інтервалі температур від 20 °С до 1000 °С питомі теплоємності:

$$c_{pm} \Big|_{20}^{1000} = \frac{1,0907 \cdot 1000 - 1,0036 \cdot 20}{1000 - 20} = 1,091 \text{ кДж / (кг К)};$$

$$c_{vm} \Big|_{20}^{1000} = \frac{0,8039 \cdot 1000 - 0,7164 \cdot 20}{1000 - 20} = 0,806 \text{ кДж / (кг К)};$$

$$c'_{pm} \Big|_{20}^{1000} = \frac{1,4097 \cdot 1000 - 1,2971 \cdot 20}{1000 - 20} = 1,412 \text{ кДж / (м}^3\text{К)};$$

$$c'_{vm} \Big|_{20}^{1000} = \frac{1,0387 \cdot 1000 - 0,9261 \cdot 20}{1000 - 20} = 1,041 \text{ кДж / (м}^3\text{К)}.$$

Підставляючи ці значення теплоємності, отримуємо:

$$\Delta s_{pm} = 1 \cdot 1,091 \cdot \ln \frac{1273}{293} \approx 1,603 \text{ кДж/К}; \quad \Delta s_{vm} = 1 \cdot 0,806 \cdot \ln \frac{1273}{293} \approx 1,184 \text{ кДж/К};$$

$$\Delta s'_{pm} = 1 \cdot 1,412 \cdot \ln \frac{1273}{293} \approx 2,074 \text{ кДж/К}; \quad \Delta s'_{vm} = 1 \cdot 1,041 \cdot \ln \frac{1273}{293} \approx 1,529 \text{ кДж/К}.$$

Відповідь: $\Delta s_p = 1,48 \text{ кДж/К}; \quad \Delta s'_p = 1,92 \text{ кДж/К};$
 $\Delta s_v = 1,06 \text{ кДж/К}; \quad \Delta s'_v = 1,37 \text{ кДж/К};$
 $\Delta s_{pm} = 1,603 \text{ кДж/К}; \quad \Delta s'_{pm} = 2,074 \text{ кДж/К};$
 $\Delta s_{vm} = 1,184 \text{ кДж/К}; \quad \Delta s'_{vm} = 1,529 \text{ кДж/К}.$

Приклад 5.4. З достатньою для технічних розрахунків точністю можна вважати, що сухе повітря складається з 0,232 масових часток кисню та 0,768 масових часток азоту. Визначити об'ємний склад повітря, його середню молекулярну масу і газову сталу, а також парціальні тиски компонентів при барометричному тиску $B = 750$ мм рт. ст. Розрахувати середню об'ємну питому теплоємність повітря як теплоємність суміші при ізобарному нагріванні її від 20 °С до 1000 °С. Використати табл. П.1.9 додатків.

Розв'язання. Перехід від масових часток до об'ємних здійснюється за формулою $r_i = (g_i / \mu_i) / \sum (g_i / \mu_i)$; $\mu_{cp} = \sum (r_i \mu_i)$. Газова стала для 1 кг суміші $R_{\mu c} = R_{\mu} / \mu_{ci}$. Парціальні тиски компонентів дорівнюють: $p_1 = r_1 B$ і $p_2 = r_2 B$. Об'ємна теплоємність суміші $\tilde{n}_m = \sum (r_i c'_i)$.

Середня в інтервалі температур від t_1 до t_2 теплоємність компонента

$$c'_{im} \Big|_{t_1}^{t_2} = \left(c'_{im} \Big|_0^{t_2} t_2 - c'_{im} \Big|_0^{t_1} t_1 \right) / (t_2 - t_1).$$

Підставляючи числові значення величин, отримуємо:

$r_1 = \frac{0,232/32}{0,232/32 + 0,768/28} = 0,21$; $r_2 = \frac{0,768/28}{0,232/32 + 0,768/28} = 0,79$; $\mu_{см} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28 = 28,84$ кг/кмоль; $R_{см} = 8314/28,84 \approx 288$ Дж/(кг К); $p_1 = 0,21 \cdot 0,1 = 0,021$ МПа; $p_2 = 0,79 \cdot 0,1 = 0,079$ МПа. За табл. П.1.9 додатків для кисню:

$$\tilde{n}'_{pm} \bigg|_0^{20} = 1,3059 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{К}); \quad c'_{pm} \bigg|_0^{1000} = 1,14775 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{К}); \text{ для азоту:}$$

$$\tilde{n}'_{pm} \bigg|_0^{20} = 1,2987 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{К}); \quad c'_{pm} \bigg|_0^{1000} = 1,3971 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{К}).$$

Середня в інтервалі температур від 20 °С до 1000 °С теплоємність кисню:

$$c'_{pm} \bigg|_{20}^{1000} = \frac{1,4775 \cdot 1000 - 1,3059 \cdot 20}{980} \approx 1,481 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{К}); \text{ азоту:}$$

$$c'_{pm} \bigg|_{20}^{1000} = \frac{1,3971 \cdot 1000 - 1,2987 \cdot 20}{980} \approx 1,399 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{К});$$

Середня теплоємність повітря $c'_{pm} = 0,21 \cdot 1,481 + 0,79 \cdot 1,399 \approx 1,416$ кДж/(м³ К).

Відмітимо, що отримані значення c'_{pm} відрізняються від значення, що вираховане з використанням даних табл. П.1.9 додатків для повітря, менше ніж на 0,3%.

Відповідь: $r_1 = 0,21$; $r_2 = 0,79$; $\mu_{ср} = 28,84$ кг/кмоль; $R_{ср} = 288$ Дж/(кг К); $p_1 = 0,021$ МПа; $p_2 = 0,079$ МПа; $c'_{pm} = 1,41$ кДж/(м³ К).

Приклад 5.5 В двигуні Дизеля паливо, яке впорскується в циліндр, са- мозаймається при перемішуванні зі стисненим в циліндрі повітрям, що має температуру вищу за температуру спалаху палива. Перед стисненням повітря в циліндрі має параметри: $t_1 = 60$ °С ; $p_1 = 0,1$ МПа. Температура спалаху палива $t_2 = 627$ °С. Визначити, при якому мінімально необхідному ступені стиснення $\varepsilon = v_1/v_2$ повітря температура його досягне t_2 і який при цьому буде тиск в циліндрі двигуна, вважаючи процес адіабатним і теплоємність незалежною від температури.

Розв'язання. Рівняння адіабатного процесу $pv^k = \text{const}$, де $k = c_{\mu p}/c_{\mu v}$ при незалежній від температури теплоємності. З цього рівняння витікає, що $p_2 = p_1 (T_2/T_1)^{\frac{k}{k-1}}$ і $\varepsilon = v_1/v_2 = (T_1/T_2)^{\frac{1}{k-1}}$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $k = 29,31/20,93 = 1,4$; $p_2 = 0,1 \left[(627 + 273)/(60 + 273) \right]^{\frac{1}{1,4-1}} = 0,1 \cdot 2,70^{3,5} \approx 3,23$ МПа; $\varepsilon = v_1/v_2 = \left[(627 + 273)/(60 + 273) \right]^{\frac{1}{1,4-1}} = 2,70^{2,5} \approx 12$.

Відповідь: $p_2 = 3,23$ МПа; $\varepsilon = 12$.

Приклад 5.6. Як зміняться результати в прикладі 5.5, якщо врахувати залежність показника адіабати від температури. Розрахувати значення ентропії повітря в кінці стиснення.

Розв'язання. Врахувати залежність показника адіабати від температури можна, прийнявши, що середній протягом процесу показник дорівнює:

$$k_{cp} = \frac{\Delta h}{\Delta u} = \frac{c_{pm} \left|_{0}^{t_2} t_2 - c_{pm} \left|_{0}^{t_1} t_1 \right.}{c_{vm} \left|_{0}^{t_2} t_2 - c_{vm} \left|_{0}^{t_1} t_1 \right.},$$

або скориставшись термодинамічними функціями газу*. В останньому випадку $p_2/p_1 = \pi_{02}/\pi_{01}$ і $v_2/v_1 = \theta_{02}/\theta_{01}$. Тоді $p_2 = p_1 \cdot \pi_{02}/\pi_{01}$ і $\varepsilon = v_1/v_2 = \theta_{01}/\theta_{02}$, де π_{01}, θ_{01} і π_{02}, θ_{02} – термодинамічні функції тиску та об'єму, визначені з таблиці термодинамічних функцій за температурами t_1 і t_2 (П.1.10 додатків).

Ентропія робочого тіла в деякому стані $s_2 = s_2^0 - R \ln(p_2/p_{i0})$, де s_2^0 визначається з табл.П.1.10 додатків за температурою t_2 ; $R = R_u/\mu$ – газова стала для 1 кг робочого тіла, p_{ny} – тиск за нормальних умов. З табл. П.1.9 додатків

визначаємо для повітря: $c_{pm} \left|_{0}^{60} = 1,0051 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$; $c_{vm} \left|_{0}^{60} = 0,7181 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$;
 $c_{pm} \left|_{0}^{627} = 1,0525 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$; $c_{vm} \left|_{0}^{627} = 0,7653 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$.

Розраховуємо $k_{cp} = (1,0525 \cdot 627 - 1,0051 \cdot 60) / (0,7653 \cdot 627 - 0,7181 \cdot 60) \approx 1,373$.

Розраховуємо $p_2 = 0,1 \cdot ((627 + 273) / (60 + 273))^{\frac{1,373}{1,373-1}} \approx 0,1 \cdot 2,70^{3,68} \approx 3,87 \text{ МПа}$.

Розраховуємо $\varepsilon = v_1/v_2 = ((627 + 273) / (60 + 273))^{\frac{1}{1,373-1}} = 2,70^{2,68} \approx 14,3$. При температурі $t_1 = 60^\circ\text{C}$, $\pi_{01} = 2,0011$ і $\theta_{01} = 4873$; при $t_2 = 267^\circ\text{C}$, $\pi_{02} = 15,349$, $\theta_{02} = 849,79$ і $s_2^0 = 7,8488 \text{ кДж/(кг К)}$. Розраховуємо: $p_2 = 0,1 \cdot 15,349 / 2,0011 \approx 3,76 \text{ МПа}$; $\varepsilon = 4873 / 349,79 \approx 13,9$; $s_2 = 7,8488 - (8,314/2,79) \ln(3,76/0,1013) \approx 6,812 \text{ кДж/(кг К)}$.

Відповідь: результати розрахунків з використанням k_{cp} і таблиць термодинамічних функцій різняться менше ніж на 3%. Вони на 19,8% вищі, ніж результати розрахунків в прикладі 5.5. Таким чином, необхідно завжди враховувати залежність теплоємності від температури.

* Слід пам'ятати при використанні таблиць С.Л.Рівкіна [П.1.10], що відлік значень параметрів u , h , s починається з нуля за Кельвінім.

Приклад 5.7. Повітря, що знаходиться при $t_1 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $p_1 = 0,1\text{ МПа}$, стискується політропно до тих пір, поки його температура не буде дорівнювати 400 К . При стисненні до повітря підводиться 50 кДж/кг теплоти. Визначити показник політропи, кінцевий тиск повітря, зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії повітря при стисненні та роботу стиснення. Зобразити схему процесу в T,s – координатах і схему енергобалансу.

Розв’язання. Кількість підведеної теплоти в політропному процесі $q = c_n \Delta T = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = \frac{c_{\mu\nu}}{\mu} \cdot \frac{n-k}{n-1} \Delta T$. Розв’язуючи це рівняння відносно n , можна визначити значення n за заданими в умові величинами. Розрахунок решти величин не викликає труднощів. Із співвідношення $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{n}{n-1}}$ витікає, що $p_2 = p_1 (T_2/T_1)^{\frac{n-1}{n}}$. Зміна внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії визначається за співвідношеннями: $\Delta u = c_{\mu\nu} (T_2 - T_1)/\mu$, $\Delta h = c_{\mu p} (T_2 - T_1)/\mu$ та $\Delta s = \frac{c_{\mu\nu}}{\mu} \frac{(n-k)}{(n-1)} \ln \frac{T_2}{T_1}$. Робота стиснення $l = q - \Delta u = \frac{R_{\mu}}{\mu(n-1)} (T_1 - T_2)$. Підставляючи числові значення величин, при $k = 1,4$ отримуємо: $(n-1,4)/(n-1) = (29 \cdot 50 / (5 \cdot 4,187 \cdot 100)) \approx 0,6926$, звідки $n=2,3$; $p_2 = 0,1 \cdot (400/300)^{2,3/1,3} \approx 0,166\text{ МПа}$; $\Delta u = (5 \cdot 4,187/29)(400 - 300) = 72\text{ кДж/кг}$; $\Delta h = (7 \cdot 4,187/29) \cdot (400 - 300) = 101\text{ кДж/кг}$; $\Delta s = (5 \cdot 4,187/29)(2,3 - 1,4/2,3 - 1) \ln(400/300) \approx 0,143\text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $l = 50 - 72 = -22\text{ кДж/кг}$; з іншого боку, $l = \frac{8,314(300 - 400)}{29(2,3 - 1)} = -22\text{ кДж/кг}$. Процес в T,s – координатах зображений на рис.5.1 а), схема енергобалансу на рис.5.1 б).

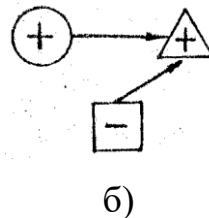
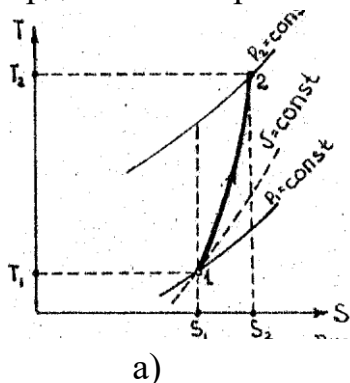


Рис. 5.1 До прикладу 5.7.

Відповідь: $n = 2,3$; $p_2 = 0,166\text{ МПа}$; $\Delta u = 72\text{ кДж/кг}$; $\Delta h = 101\text{ кДж/кг}$; $\Delta s = 0,143\text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $Q = -22\text{ кДж/кг}$.

Задачі

Задача 5.1. Кисень, що використовується для газозварювання, знаходиться в сталевому балоні, манометр на редукторі якого показує тиск 14,9 МПа при 20 °С і барометричному тиску 750 мм рт.ст. Ємність балону 60л. Балон розрахований на максимальний абсолютний тиск 25 МПа. При пожежі в приміщенні, де знаходився балон, температура кисню в балоні підвищилася до 400 °С. Розрахувати масу кисню в балоні та визначити, витримає чи ні балон новий тиск?

Відповідь: $m = 11,8$ кг; ні.

Задача 5.2. Істину мольну ізобарну теплоємність повітря при температурах до 1000 °С можна розрахувати за формулою $c_{mp} = 28,7558 + 0,057208t$ кДж/(кмоль К). Розрахувати середню ізобарну масову теплоємність повітря в інтервалі температур 200...800 °С та порівняти її із значенням, що розраховані на основі даних табл.П.1.7 додатків.

Відповідь: $c_{pm} \Big|_{200}^{800} = 1,091$ кДж/(кг К).

Задача 5.3. 5 кг азоту, що знаходиться в сталевому балоні при абсолютному тиску 0,1 МПа та температурі 27 °С, нагрівають до тих пір, поки тиск газу не зросте в три рази. Розрахувати кінцеву температуру газу, кількість підведеної до нього теплоти, зміну його внутрішньої енергії та ентропії, вважаючи, що теплоємність залежить від температури. Використати табл. П.1.8 додатків.

Відповідь: $t_2 = 627$ °С; $Q = 2352$ кДж; $\Delta U = 2352$ кДж; $\Delta S = 2,90$ кДж/К.

Задача 5.4. Вважаючи вологе повітря сумішшю ідеальних газів – сухого повітря та водяної пари, розрахувати кількість теплоти, що підведена до вологого повітря, яке знаходиться в щільно зачиненому приміщенні розміром $5 \times 6 \times 3$ м³, якщо температура повітря зросла з 10 до 25 °С. Парціальний тиск водяної пари в повітрі дорівнює 0,02 бар, а загальний тиск суміші – 750 мм рт. ст. перед нагріванням.

Відповідь: $Q \approx 1210$ кДж.

Задача 5.5. 1 кг повітря, стан якого характеризують параметри $p_1 = 0,1$ МПа і $t_1 = 27$ °С, стискується адіабатно до тих пір, поки його температура не стає рівною $t_2 = 627$ °С, а потім розширюється ізотермічно до початкового тиску. Розрахувати роботу, що витрачається на стиснення повітря, його тиск і об'єм в кінці стиснення та кількість теплоти, що підводиться в про-

цесі ізотермічного розширення. Задачу розв'язати, вважаючи: а) теплоємність повітря постійною; б) теплоємність повітря змінною та використовуючи таблицю термодинамічних функцій П.1.10 додатків. Зобразити процеси в T, s – координатах.

Відповідь: а) $l = -430$ кДж/кг; $p_2 = 4,68$ МПа; $v_2 = 0,055$ м³/кг; $q = 1,1$ кДж/кг;
б) $l = -460$ кДж/кг; $p_2 = 5,42$ МПа; $v_2 = 0,0475$ м³/кг; $q = 1,14$ кДж/кг.

Задача 5.6. 10 кг повітря підігрівається при сталому об'ємі на 200 °С, а потім розширюється за законом $p v^k = \text{const}$, де $k = c_p/c_v = \text{const}$, до початкової температури (до підігрівання). Розрахувати термодинамічну роботу цих процесів, вважаючи повітря ідеальним газом, для якого $k = 1,4$.

Відповідь: $L = 1435$ кДж.

Задача 5.7. Діоксид вуглецю знаходиться під тиском $p_1 = 4,4$ МПа при температурі $t_1 = 660$ °С. Після адіабатичного розширення тиск газу дорівнює $p_2 = 0,2$ МПа. Визначити параметри газу v_1 , u_1 , h_1 , v_2 , t_2 , u_2 і h_2 та розрахувати значення показника адіабати, враховуючи його залежність від температури. Використати таблицю С.Л.Рівкіна термодинамічних функцій газу [2.4].

Відповідь: $v_1 \approx 0,0375$ м³/кг; $v_2 \approx 0,489$ м³/кг; $t_2 = 243$ °С; $u_1 \approx 653$ кДж/кг;
 $u_2 \approx 320,5$ кДж/кг; $h_1 \approx 817,8$ кДж/кг; $h_2 \approx 418$ кДж/кг; $k_{cp} = 1,2$.

Задача 5.8. В компресорі газової турбіни стискується повітря від тиску $p_1 = 0,1$ МПа до $p_2 = 0,5$ МПа. Початкова температура повітря $t_1 = 30$ °С, а температура після стискування $t_2 = 150$ °С. Розрахувати зміни внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії повітря в процесі стискування, використавши таблиці С.Л.Рівкіна.

Відповідь: $\Delta u = 86,7$ кДж/кг; $\Delta h = 121$ кДж/кг; $\Delta s = -0,125$ кДж/(кг К).

Задача 5.9. Окис вуглецю, що знаходиться під тиском 1 МПа при температурі 127 °С, розширюється політропно до тиску 0,1 МПа так, що робота, яка здійснюється газом, реалізується за рахунок підводу теплоти (25%) і за рахунок зменшення внутрішньої енергії газу (75%). Визначити показник політропи, теплоємність процесу, роботу розширення, теплоту процесу та температуру газу в кінці розширення. Зобразити процес в p, v - координатах і його схему енергобалансу.

Відповідь: $n = 1,3$; $c_n = -0,249$ кДж/(кг К); $h = 162,8$ кДж/кг; $T_2 = 235,5$ К.

Задача 5.10. В кімнаті площею 30 м² та висотою 3 м знаходиться сухе повітря при температурі 27 °С і барометричному тиску 750 мм рт.ст. Розрахувати масу повітря в кімнаті та кількість повітря, що проникає в кімнату з

вулиці, якщо барометричний тиск зріс на 20 мм рт.ст., а температура повітря в кімнаті знизилася до 18 °С?

Відповідь: $m = 104,6$ кг; $\Delta m = 4,7$ кг.

Задача 5.11. В балоні об'ємом 0,1 м³ знаходиться 2 кг газу при температурі 15 °С та манометричному тиску 1,4 МПа. Барометричний тиск $B = 1$ бар. Визначте, який газ знаходиться в балоні, та розрахуйте кількість теплоти, що підведена до газу в результаті нагрівання балону сонячними променями, якщо температура газу підвищилася до 30 °С. Теплоємність вважати незалежною від температури.

Відповідь: кисень; $Q = 19,6$ кДж.

Задача 5.12. 10 кг двоокису вуглецю CO₂ розширюється при постійному тиску 1 МПа від стану, в якому питомий об'єм газу дорівнює 0,0535 м³/кг, до стану, в якому він збільшується в 4,5 рази. Розрахувати початкову та кінцеву температуру газу, зміну його внутрішньої енергії та ентропії, а також кількість підведеної до газу теплоти. Врахувати залежність теплоємності від температури, скориставшись табл.П.1.7 додатків.

Відповідь: $T_1 = 283$ К; $T_2 = 1273$ К; $Q = 11180$ кДж; $\Delta S = 17$ кДж/К; $\Delta U = 9308$ кДж.

Задача 5.13. Окис вуглецю розширюється політропно виконуючи 25% роботи за рахунок кількості теплоти, яка підводиться до газу, та 75% роботи за рахунок внутрішньої енергії газу. Розрахувати показник політропи та питому теплоємність цього процесу, побудувати схему його енергобалансу.

Відповідь: $n = 1,3$; $c_n \approx -0,249$ кДж/(кг К).

Задача 5.14. Робоче тіло, що являє собою суміш водяної пари з продуктами згоряння палива, масова доля яких в суміші $g_r = 0,7$, здійснює цикл. Температури в двох характерних точках циклу дорівнюють 500 °С та 800 °С. Розрахувати питомі масові ізобарні теплоємності суміші при температурах 500 °С і 800 °С, різницю внутрішніх енергій суміші в цих точках, питомий об'єм суміші при 500 °С та тиску 1 МПа і парціальні тиски компонентів. Прийняти, що продукти згоряння мають властивості повітря. Використати табл. П.1.7, П.1.12 додатків.

Відповідь: $c_{p_{cm}}^{500} = 1,404$ кДж/(кг К); $c_{p_{cm}}^{800} = 1,511$ кДж/(кг К); $\nu_{cm} = 0,262$ м³/кг.

Задача 5.15. 1 кг газу здійснює цикл, що утворений процесами: адіабатного розширення 1-2; ізотермічного стиснення 2-3 та ізобарного розширення 3-1. В точці 1 параметри газу p_1 та t_1 ; в точці 2 тиск p_2 . Розрахувати парамет-

ри газу в характерних точках циклу, кількість теплоти і роботу циклу, приймаючи теплоємність газу: а) постійною за молекулярно-кінетичною теорією; б) залежною від температури, використовуючи табл.П.1.10 додатків термодинамічних функцій газу. Зобразити цикл в p, v - та T, s – координатах і схеми енергобалансів процесів. Вихідні дані взяти з табл.П.2.6 додатків.

Задача 5.16. 1 кг газу здійснює цикл, що утворений процесами: 1-2 – політропного розширення при $n_1 = 1,25$; 2-3 – політропного стиснення при $n_2 = 0,9$; 3-1 – ізобарного розширення. Параметри газу в точці 1 задані тиском p_1 і температурою t_1 ; в точці 2 заданий тиск p_2 . Розрахувати параметри газу в характерних точках циклу, кількість теплоти та роботу циклу. Зобразити цикл в T, s – координатах і схеми енергобалансів процесів. Вихідні дані взяти з табл.П.2.7 додатків.

Задача 5.17. В житловій кімнаті об'ємом 60 м^3 протягом деякого часу працював опалювальний прилад, в результаті чого температура повітря підвищилась від 15°C до 25°C . Тиск повітря в кімнаті при цьому не змінювався і залишався рівним барометричному $B = 750 \text{ мм рт.ст.}$ Розрахувати зміну внутрішньої енергії повітря в кімнаті, вважаючи його ідеальним газом.

Відповідь: $\Delta U = 0$.

Задача 5.18. Визначити, чи виконуються умови внутрішньої оборотності в наступних процесах: а) ізобарного розширення від $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ до $V_2 = 2,5 \text{ м}^3$ при $p = 0,6 \text{ МПа}$, якщо робота проти зовнішніх сил в цьому процесі дорівнює 800 кДж ?; б) ізотермічному при $T = 410 \text{ К}$, якщо ентропія робочого тіла зменшується на $0,44 \text{ кДж/(кг К)}$, а в процесі відводиться 255 кДж/кг енергії в формі теплоти?; в) ізотермічному при $T = 300 \text{ К}$, якщо ентропія робочого тіла змінюється на $\Delta S = 4,5 \text{ кДж/К}$, ентальпія робочого тіла збільшується на $\Delta H = 500 \text{ кДж}$, а зовнішня робота переміщення дорівнює 1000 кДж ?; г) ізобарного розширення від $V_1 = 0,223 \text{ м}^3$ до $V_2 = 0,65 \text{ м}^3$ при $p = 0,5 \text{ МПа}$, якщо до робочого тіла в процесі підводиться кількість теплоти $837,4 \text{ кДж}$, а зміна його внутрішньої енергії складає $+628 \text{ кДж}$?

Відповідь: а) не виконуються; б) не виконуються; в) такий процес неможливий; г) виконуються.

Задача 5.19. Два ідеальних гази – одноатомний та двоатомний мають однакові початкові об'єми $V_{o1} = V_{o2}$ при однакових початкових тисках $p_{o1} = p_{o2}$. Обидва гази розширюються адіабатно так, що $V_{к1} = 2V_{o1}$ і $V_{к2} = 2V_{o2}$. Визначити: тиск, температура, питома внутрішня енергія якого газу зміняться більше? Який газ здійснить більшу питому термодинамічну роботу?

Відповідь: тиск та температура зміняться більше у одноатомного газу; зміна питомої внутрішньої енергії газів та величина питомої термодинамічної роботи залежать від молекулярних мас газів, які порівнюються, і будуть більшими у двоатомного газу.

2.6. ВЛАСТИВОСТІ ВОДЯНОЇ ПАРИ І АНАЛІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВОДЯНОЇ ПАРИ

Мета – поглибити знання про властивості водяної пари, сформувані вміння розрахунку процесів зміни стану водяної пари.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Необхідно знати: фізичну сутність процесів випаровування і кипіння води; сутність понять: «температура і тиск насичення», «суха насичена, волога насичена і перегріта пара», «ступінь (міра) сухості і ступінь вологості пари» (в тому числі одиниці і діапазон зміни цих величин); позначення параметрів пари різних станів; p, v - діаграму станів водяної пари; розміщення основних областей фазових станів, граничних кривих та ізотерм холодної рідини на ній; сутність понять «потрійна точка», «критичний стан»; значення термічних параметрів води в критичному стані; сутність понять: «теплота нагрівання рідини», «теплота пароутворення», «теплота перегріву», «ступінь перегріву»; співвідношення для розрахунку параметрів води і пари на різних стадіях процесу пароутворення; зміст таблиць, T, s - і h, s - діаграм термодинамічних властивостей води і водяної пари; зображення окремих термодинамічних процесів водяної пари в p, v - T, s - і h, s - діаграмах; загальну методологію аналізу окремих термодинамічних процесів водяної пари.

Рекомендована література: [1.1], [1.2], [1.4], [2.1], [3.1], [3.2].

Рекомендації до вивчення матеріалу по темі

Водяна пара широко використовується як робоче тіло в багатьох галузях промисловості. Перехід рідини в пару може відбуватися шляхом випаровування і кипіння. Слід усвідомити фізичну сутність цих явищ і чітко уявляти їх принципову відмінність. Усвідомити сутність таких основних характеристик процесу кипіння, як температура і тиск насичення, і взаємозв'язок між ними; запам'ятати, що кипіння – це ізобарно-ізотермічний процес при одночасно постійних тиску і температурі насичення. Звернути увагу на те,

що в промисловості водяну пару отримують в ізобарному процесі нагрівання води в парогенераторах.

Потім слід розібратися з можливими станами (волога насичена, суха насичена, перегріта) водяної пари і усвідомити, якими термічними параметрами можна однозначно визначити кожен з цих станів. Запам'ятати, що склад вологої насиченої пари характеризується ступенем (мірою) сухості пари x , усвідомити сутність цієї величини, діапазон зміни її числових значень, а також, які стани води і пари відповідають характерним значенням $x = 0$ та $x = 1$. Звернути увагу на те, що $(1 - x)$ – ступінь (міра) вологості пари. Слід запам'ятати, як позначають параметри води і пари в характерних станах, що таке ступінь перегріву та теплота перегріву пари.

Розібратися з будовою p, v - діаграми, розглянувши в p, v - координатах кілька процесів отримання пари при постійному тиску. Звернути увагу на форму і розташування основних ліній діаграми: ізотерми потрійної точки, нижньої і верхньої пограничних кривих, ізотерм, а також на розташування характерних точок – потрійної та критичної. Усвідомити фізичну сутність станів речовини H_2O – критичного і в потрійній точці. Запам'ятати значення термічних параметрів H_2O в цих станах: $p_{кр} = 22,129$ МПа; $t_{кр} = 374,15$ °С; $v_{кр} = 0,00326$ м³/кг; $p_T = 0,0006112$ МПа; $t_T = 0,01$ °С. Усвідомити і чітко уявляти розташування на діаграмі основних областей фазових станів води і водяної пари.

Критична точка характеризує стан, при якому зникає відмінність у властивостях пари та рідини. Критична температура – це найвища температура рідини та її насиченої пари. При більш високих температурах існує лише перегріта пара.

Необхідно вивчити, як розраховують параметри води і водяної пари на початку і в кінці кожної з трьох стадій процесу пароутворення; запам'ятати, що за початок відліку калоричних параметрів прийнято стан потрійної точки. Нехтуючи впливом тиску на зміну об'єму води, можна вважати, що при 0 °С і будь-якому тиску води $u_o = 0$; $h_o = 0$; $s_o = 0$ і $v_o = 0,001$ м³/кг. Усвідомити сутність понять «теплота нагрівання рідини», «теплота пароутворення», «теплота перегріву». Запам'ятати основні розрахункові співвідношення для обчислення параметрів води і пари, звернувши увагу на співвідношення для розрахунку параметрів вологої пари при $0 < x < 1$.

При аналітичних розрахунках адіабатичних процесів з водяною парою і невеликих змінах її тиску слід приймати такі значення показника адіабати k : 1,135 – для сухої насиченої пари; $1,035 + 0,1x$ – для вологої насиченої пари при початковому значенні ступеня сухості x пари; 1,3 – для перегрітої пари.

Через відсутність простого і зручного для практичного використання рівняння стану водяної пари при розрахунках процесів зміни стану пари широко використовують таблиці і діаграми термодинамічних властивостей водяної пари. Вивчаючи таблиці, необхідно: з'ясувати типи існуючих таблиць і їх кількість; запам'ятати назви таблиць і параметрів станів води і водяної пари, що визначаються по кожній з них; які вихідні параметри стану повинні бути задані, щоб скористатися кожною з таблиць. Слід звернути увагу на відомості, які наведені в таблиці «Вода і перегріта водяна пара».

Вивчати будову таблиць обов'язково за [2.1, 2.6], а при розрахунках в окремих випадках можна використовувати скорочені варіанти таблиць, наведені, наприклад, в [1.5, 1.6]. Використовуючи таблиці слід враховувати, що для перегрітої пари при $t = \text{const}$ маємо $v > v''$, якщо тиск пари $p < p_n$, і при $p = \text{const}$ $v > v''$, якщо температура пари $t > t_n$.

При аналізі процесів за допомогою таблиць бажано спочатку з'ясувати в якому стані знаходиться робоче тіло (пара) на початку та в кінці процесу, порівнюючи при заданому тиску значення будь-якого відомого параметру (v, T, h, s) з відповідним значенням цього параметру для сухої насиченої пари. Якщо пара буде вологою насиченою, то розраховують її міру сухості а потім інші параметри. В інших випадках значення параметрів пари визначають безпосередньо за таблицями. Через складність розрахунків з використанням таблиць широко використовують графо-аналітичний метод розрахунку теплових процесів за допомогою T,s та h,s^* діаграм.

Вивчати ентропійні діаграми T,s і h,s водяної пари доцільно в два прийоми. Перший раз вивчити їх формально, запам'ятавши, які лінії нанесені на діаграмах, як вони розташовані, яка їхня форма, як проставлені цифрові позначки на лініях, які максимальні і мінімальні значення параметрів стану зазначені на діаграмах, який масштаб діаграм по вісях координат. Слід звернути увагу на те, що для практичного використання h,s - діаграми у великому масштабі будують тільки так звану її робочу частину.

Потім необхідно вивчити особливості побудови і використання кожної з діаграм більш докладно, звернувши увагу на наступне. Так як ентропію і ентальпію води при $t = 0^\circ\text{C}$ і будь-якому тиску приймають умовно рівними нулю, то в T,s - координатах ізотерма холодної води перетворюється в точку, що лежить на вісі ординат на 273 К вище абсолютного нуля і служить початком побудови нижньої пограничної кривої, а в h,s - координатах нижня погранична крива виходить з початку координат.

* Запропонована Р.Мольє в 1904р. Будується по точках, координати h і s яких вибирають з таблиць термодинамічних властивостей водяної пари.

Пограничні криві наносять по точках, використовуючи дані таблиць термодинамічних властивостей води і водяної пари, а в h,s - координатах за значеннями h і s наносять і всі інші лінії. Пограничні криві перетинаються в точці К, яка визначає критичний стан. В T,s - діаграмі точка К лежить на вершині кривої, утвореної лініями $x = 0$ і $x = 1$, а в h,s - діаграмі ця точка зміщена від вершини вліво вниз (так як при наближенні до критичного стану різко зменшується теплота пароутворення, а отже, і ентропія сухої насиченої пари). Ентропія киплячої рідини $s' = c_p \ln(T_n / 273)$.

Для чіткого уявлення про характер ізобар та ізохор слід проаналізувати співвідношення для кутових коефіцієнтів ізобар та ізохор у відповідних системах координат: $(dT/ds)_p = T/c_p$; $(dT/ds)_v = T/c_v$; $(dh/ds) = T$.

Вважають, що ізобари нагрівання води при $p \leq p_{кр}$ співпадають з нижньою пограничною кривою $x = 0$, оскільки їх кривизна несуттєво відрізняється від кривизни лінії $x = 0$ і кожна з ізобар має з нею дві спільні точки. Таким чином, нижня погранична крива являє собою всю область станів рідини від 0°C до температури t_n при різних тисках аж до $p_{кр}$. Ізобари для $p > p_{кр}$ проходять лівіше лінії $x = 0$ і перетинають її тільки в точці 273 К. Ізобара $p_{кр}$ води проходить по лінії $x = 0$ і після перегину в точці К перетворюється на ізобару перегрітої пари. Процес пароутворення – ізобарно-ізотермічний, тому в області вологої насиченої пари ізобари зображуються: горизонтальними лініями в T,s - діаграмі ($c_p = \infty$); похилими прямими лініями з кутовим коефіцієнтом $(dh/ds)_p = T_n$, дотичними до лінії $x = 0$, в h,s - діаграмі. Оскільки, зі збільшенням тиску температура T_n зростає, то ізобари високого тиску йдуть крутіше; теплоємність перегрітої пари залежить від тиску і в області перегрітої пари ізобари різних тисків не паралельні.

Ізохори – складні криві (s -подібні в T,s - діаграмі в області вологої насиченої пари), що мають в області перегрітої пари такий же характер, як і ізобари, але йдуть крутіше ізобар. Їх наносять на діаграму штриховими або лініями червоного кольору.

Необхідно проаналізувати хід ізотерм в h,s - діаграмі, пам'ятаючи, що поблизу лінії $x = 1$ властивості пари істотно відрізняються від властивостей ідеального газу, а далеко від пограничної кривої пара наближається за своїми властивостями до ідеального газу, ентальпія якого $h = h(t)$. Слід також звернути увагу на розташування ліній $h = \text{const}$ в T,s - діаграмі і ліній $x = \text{const}$ в T,s - і h,s - діаграмах.

Площа під кривою процесу в T,s - діаграмі зображує в масштабі кількість теплоти процесу. Слід усвідомити, які площі зображують кількість теп-

лоти нагрівання рідини, теплоти пароутворення, перегріву, ентальпії h_x , h'' , h пари (нехтуючи $p v_0$). Для отримання кількісних результатів треба розраховувати площі під кривими процесів, що ускладнює розрахунок і знижує його точність. Площа під ізобарою на T,s - діаграмі визначає величину ентальпії в даній точці ізобари.

Слід запам'ятати, що кількість теплоти і ентальпія в h,s - діаграмі вимірюються лінійними відрізками, а площа під кривою процесу в цій діаграмі фізичного сенсу не має.

Необхідно пам'ятати, що при використанні як таблиць, так і діаграм для всіх станів води і водяної пари внутрішня енергія $u = h - p v$.

Приступаючи до аналізу процесів водяної пари, необхідно вивчити і запам'ятати мету аналізу процесів водяної пари і загальну методологію його виконання. Потім запам'ятати такі практичні рекомендації щодо виконання аналізу: доцільно до проведення аналізу спробувати встановити початковий і кінцевий стани робочого тіла за вихідними даними і ретельно зобразити схематично процес, що аналізується, в h,s - координатах; звертати увагу на залежність від стану пари закономірностей зміни його параметрів; при використанні h,s - діаграми Δh і Δs обчислюються як добуток довжини відповідного відрізка на масштаб діаграми, а аналіз зводять до читання діаграми; кількість теплоти і роботи процесу обчислюють або за першим законом термодинаміки, або за графічною інтерпретацією цих значень на діаграмах. В ізотермічному процесі водяної пари $\Delta u \neq 0$, тобто $u_1 \neq u_2$, що має бути враховано в схемі енергобалансу процесу.

Доцільно проаналізувати самотійно будь-який конкретний термодинамічний процес, в якому пара переходить з області перегрітого в область насиченого стану або навпаки. Корисно запам'ятати, що при тисках до 3 МПа і $x \geq 0,8$ можна розраховувати для вологої насиченої пари $v_x = v''x$. Це дозволяє визначити ступінь сухості пари як $x = v_x / v''$.

Питання для самоконтролю знань

1. Чим відрізняються один від одного процеси випаровування і кипіння?
2. Чи взаємозалежні тиск і температура при кипінні?
3. Назвіть можливі стани пари. Сформулюйте поняття фази та правило фаз Гіббса і скажіть, яка кількість фаз може співіснувати одночасно в однокомпонентній (двокомпонентній) системі?
4. Що таке ступінь сухості і ступінь вологості пара?
5. Що таке теплота пароутворення? Назвіть її складові частини.

6. При яких значеннях тиску і температури прийняті рівними нулю значення калоричних параметрів пари?
7. Дайте визначення стану потрійної точки. Які значення тиску і температури в цьому стані для H_2O ?
8. Дайте визначення критичного стану H_2O . Які значення тиску і температури в цьому стані? Чому в критичній точці теплота пароутворення дорівнює нулю?
9. Покажіть схематично p,v - діаграму води і водяної пари і вкажіть характерні області станів H_2O .
10. Які стани H_2O відображають нижня і верхня пограничні криві і які значення x в цих станах?
11. За якою з таблиць можна визначити параметри стану H_2O , якщо це: нагріта вода, кипляча вода, суха насичена пара, волога насичена пара, перегріта пара?
12. Як обчислюють параметри стану вологої пари?
13. Зобразіть схематично p,T - та T,s - діаграми станів води і водяної пари, провівши в координатах T,s характерні лінії цих діаграм.
14. Зобразіть схематично p,T - та h,s - діаграми станів води і водяної пари та виділіть на ній робочу зону.
15. Як графічно за T,s - діаграмою можна визначити ентальпію киплячої рідини, теплоту пароутворення, теплоту перегріву?
16. Яку температуру має кипляча вода, якщо її ентропія дорівнює нулю?
17. Від якого умовного нуля відлічують значення калоричних параметрів водяної пари? Чому так?
18. Покажіть за допомогою T,s - діаграми, як змінюється вологість пари при адіабатичному розширенні пари, якщо в початковому стані її ентропія:
а) $S'' > S_{кр}$; б) $S'' < S_{кр}$.
19. Зобразіть схематично окремі термодинамічні процеси водяної пари в T,s - і h,s - діаграмах, якщо в початковому стані пара перегріта, а в кінцевому – волога насичена.
20. Сформулюйте мету аналізу процесів водяної пари і перерахуйте, що має бути задано для його виконання.
21. У чому відмінність методики аналізу процесів водяної пари від методики аналізу процесів ідеального газу?
22. Як обчислити кількість теплоти та роботи процесу при аналізі процесів водяної пари?
23. У чому відмінність схеми енергобалансу ізотермічного процесу водяної пари від аналогічної схеми для ідеального газу?
24. Як змінюється теплоємність перегрітої водяної пари?

Приклади

Приклад 6.1. Визначити стан робочого тіла та значення термічних і калоричних параметрів стану за таблицями термодинамічних властивостей води та водяної пари, якщо відомо, що: а) $p = 1$ МПа, $t = 350$ °С; б) $p = 0,5$ МПа; $\rho = 2,669$ кг/м³; в) $t = 200$ °С; $v = 0,1$ м³/кг.

Розв'язання. *Випадок а.* За таблицею «Суша насичена водяна пара та вода на лінії насичення (за тиском)» [2.1], тиску 1 МПа відповідає температура насичення 179,88 °С. Так як ця температура нижче заданої, то пара перегріта. Параметри стану такої пари визначаємо за таблицею «Вода та перегріта водяна пара» [2.1]: $v = 0,2822$ м³/кг; $h = 3156$ кДж/кг; $s = 7,296$ кДж/(кг К). Внутрішня енергія пари розраховується за співвідношенням: $u = h - pv$; $u = 3156 - 1 \cdot 10^3 \cdot 0,2822 = 2847$ кДж/кг.

Випадок б. За таблицею «Суша насичена водяна пара та вода на лінії насичення (за тиском)», тиску 0,5 МПа відповідає густина сухої насиченої пари $\rho'' = 2,669$ кг/м³. Таким чином, пара суха насичена, і з цієї ж таблиці визначаємо її параметри: $t_n = 151,84$ °С; $v'' = 0,3774$ м³/кг; $h'' = 2749$ кДж/кг; $s'' = 6,822$ кДж/(кг К). Внутрішня енергія $u'' = h'' - pv''$; $u'' = 2749 - 0,5 \cdot 10^3 \cdot 0,3747 = 2561$ кДж/кг.

Випадок в. За таблицею «Суша насичена водяна пара та вода на лінії насичення (за температурою)» [2.1], температурі 200 °С відповідає питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,1272$ м³/кг, що більше заданого за умовою. Питомий об'єм води, що кипить, $v' = 0,0011565$ м³/кг. Так як $v' < v < v''$, то пара волога насичена і для визначення її параметрів стану необхідно розрахувати ступінь (міру) сухості x . Із співвідношення $v_x = v''x + v'(1 - x)$ випливає, що $x = (v_x - v') / (v'' - v')$; $x = (0,1 - 0,0011565) / (0,1272 - 0,0011565) = 0,784$. Значення h і s розраховують за такими за структурою формулами, як і для розрахунку v . Тоді $h = 2793 \cdot 0,784 + (1 - 0,784) \cdot 852 = 2373$ кДж/кг; $s = 6,4318 \cdot 0,784 + (1 - 0,784) \cdot 2,3308 = 5,5459$ кДж/(кг К). Внутрішня енергія пари $u = h - p_i v$, де $p_n = 1,5551$ МПа тиск насиченої пари при температурі 200 °С $u = 2373 - 1,5551 \cdot 10^3 \cdot 0,1 = 2217$ кДж/кг.

Відповідь: а) пара перегріта; б) пара суха насичена; в) пара волога насичена.

Приклад 6.2. Користуючись h,s - діаграмою, визначити стан водяної пари і параметри цього стану, якщо відомо: а) $p = 0,35$ МПа; $t = 330$ °С; б) $p = 0,004$ МПа; $v = 35$ м³/кг; в) $t = 110$ °С; $v = 1,2$ м³/кг.

Розв'язання. *Випадок а.* Знаходимо на h,s - діаграмі точку А перетину ізотерми 330 °С з ізобарою 0,35 МПа. Через цю точку проходить ізохора $v = 0,8$ м³/кг. Так як точка А лежить вище верхньої пограничної кривої $x = 1$, пара – перегріта. Для визначення ентальпії виміряємо відстань від найближчої до точки А оцифрованої ізоентальпії ($h_0 = 3000$ кДж/кг) до точки А ($l_h = 31,5$ мм) та множимо її на масштаб по вісі ентальпій ($\mu_h = 4$ кДж/(кг мм)), а отриманий результат додаємо до значення ентальпії h_0 , від якого починається відлік відстані до точки А на діаграмі: $h = h_0 + l_h \mu_h$. Аналогічно робимо і при визначенні ентропії ($s_0 = 7,5$ кДж/(кг К); $l_s = 23,5$ мм; $\mu_s = 0,01$ кДж/(кг К мм)). Ентальпія пари $h = 3000 + 31,5 \cdot 4 = 3126$ кДж/кг; ентропія пари $s = 7,5 + 23,5 \cdot 0,01 = 7,735$ кДж/(кг К). Внутрішня енергія пари $u = h - pv = 3126 - 0,35 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \approx 2846$ кДж/кг.

Випадок б. Знаходимо на h,s - діаграмі точку В перетину ізобари 0,004 МПа та ізохори 35 м³/кг, яка лежить на верхній пограничній кривій $x = 1$. Отже, пара – суха насичена. Точка В лежить між ізотермами 20 °С і 30 °С. Інтерполюючи, визначаємо, що через точку В проходить ізотерма 29 °С. Отже, температура пари $t = 29$ °С. Аналогічно, $h = 2552$ кДж/кг; $s = 8,475$ кДж/(кг К). Внутрішня енергія пари визначається за співвідношенням $u = h - pv$. Отже, $u = 2412$ кДж/кг.

Випадок в. Знаходимо на h,s - діаграмі точку С, яка лежить на перетині ізохори 1,2 м³/кг та ізотерми 110 °С нижче верхньої граничної кривої $x = 1$. Отже, пара – волога насичена. Через точку С проходить лінія постійного ступеня (міри) сухості пари $x = 0,97$. В області вологої насиченої пари ізотерми та ізобари співпадають. Безпосередньо з діаграми знаходимо: $p = 0,14$ МПа. Калоричні параметри визначаються так само, як і для випадку а: $h = 2620$ кДж/кг; $s = 7,07$ кДж/(кг К); $u = 2452$ кДж/кг.

Відповідь: а) пара перегріта; б) пара суха насичена; в) пара волога насичена.

Приклад 6.3. На вході до пароперегрівача котла пара має тиск 1,3 МПа та ступінь (міру) сухості 0,98, а на виході з перегрівача температура пари дорівнює 425 °С. Нехтуючи втратами тиску на подолання паровою гідравлічного опору пароперегрівача, процес перегрівання пари можна вважати ізобарним. Розрахувати, яку кількість теплоти необхідно витратити щосекунди на пере-

грівання пари, якщо паропроодуктивність котла 10 т/год. Визначити параметри пари на вході та виході пароперегрівача. Розрахунок провести, використовуючи таблиці та h,s - діаграму водяної пари. Зобразити процес в h,s - координатах.

Розв'язання. Витрата теплоти на перегрівання пари $Q = Dq_p$, де $q_p = h_2 - h_1$ – питома витрата теплоти на перегрів пари в ізобарному процесі, кДж/кг. Таким чином, розв'язання зводиться до знаходження параметрів пари.

При використанні таблиць діють наступним чином: за тиском p_1 з таблиць «Суша насичена водяна пара та вода на лінії насичення (за тиском)» визначають температуру t_1 та значення z' та z'' решти (v , h , s); параметрів; значення z цих параметрів на вході пароперегрівача розраховують за співвідношенням $z_1 = z_1''x_1 + z_1'(1 - x_1)$; внутрішня енергія $u_1 = h_1 - p_1v_1$; з таблиць «Вода та перегріта водяна пара» за тиском $p_2 = p_1$ та температурою t_2 визначають параметри v_2 , h_2 і s_2 на виході з пароперегрівача; $u_2 = h_2 - pv_2$.

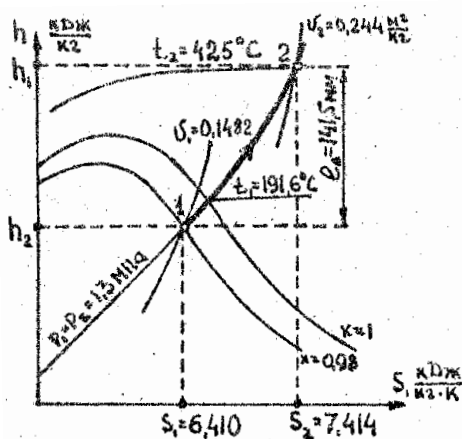


Рис. 6.1. До прикладу 6.3.

Якщо параметри пари визначати не потрібно, то q_p можна визначити безпосередньо по діаграмі, вимірявши довжину відрізка l_Δ , пропорційну $\Delta h = h_2 - h_1$. Тоді $q_p = l_\Delta \mu_h$, де μ_h – масштаб діаграми по вісі ентальпій.

Отже: $t_1 = 196$ °C; $v_1' = 0,00114$ м³/кг; $v_1'' = 0,1512$ м³/кг; $h_1' = 814,5$ кДж/кг; $h_1'' = 2787$ кДж/кг; $s_1' = 2,251$ кДж/(кг К); $s_1'' = 6,495$ кДж/(кг К); $v_1 = 0,1512 \cdot 0,98 + (1 - 0,98)0,00114 = 0,1482$ м³/кг; $h_1 = 2787 \cdot 0,98 + (1 - 0,98) \cdot 814,5 = 2747$ кДж/кг; $s_1 = 6,495 \cdot 0,98 + (1 - 0,98) \cdot 2,251 = 6,410$ кДж/(кг · К); $u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1$; $u_1 = 2747 - 1,3 \times 0,148 \cdot 10^3 = 2554$ кДж/кг; $v_2 = 0,2440$ м³/кг; $h_2 = 3312$ кДж/кг; $s_2 = 7,424$ кДж/(кг К);

$u_2 = h_2 - p \cdot v_2$; $u_2 = 3312 - 1,3 \cdot 0,2440 \cdot 10^3 = 2995$ кДж/кг; $q_p = h_2 - h_1 = 3312 - 2747 = 565$ кДж/кг; $l_\Delta = 141,5$ мм; $\mu_h = 4$ кДж/(кг мм); $q_p = l_\Delta \mu_h = 141,5 \cdot 4 = 566$ кДж/кг; $Q = 565 \cdot 2,78 \approx 1571$ кВт. Процес в h,s - координатах зображений на рис.6.1.

Відповідь: $Q \approx 1571$ кВт.

Приклад 6.4. Об'єм барабана парового котла дорівнює $18,5 \text{ м}^3$. На початку розпалювання в ньому знаходиться $m = 0,5 \cdot 10^3$ кг суміші води та пари при тиску $3,5$ МПа і температурі насичення. Нехтуючи втратами теплоти при теплопередачі від топкових газів до води та водяної пари, розрахувати, за який час при закритих клапанах (засувках) на лінії живильної води і на паровій магістралі тиск пари зросте до $5,0$ МПа, якщо потужність теплового потоку, який спрямований від топкових газів до робочого тіла в барабані, дорівнює 300 кВт. Визначити, скільки води та сухої пари знаходиться в барабані котла, а також основні параметри стану вологої пари в момент, коли тиск досягне $5,0$ МПа. Розрахунок провести, використовуючи таблиці та h,s - діаграму водяної пари. Зобразити процес в h,s - координатах.

Розв'язання. Час розпалювання котла $\tau = Q / Q_{\text{ТТ}}$, де Q - кількість теплоти, що необхідна для підйому тиску в барабані котла до $p_2 = 5,0$ МПа. Так як процес ізохорний, то $Q = m(u_2 - u_1)$, де $u_1 = h_1 - p_1 v_1$; $u_2 = h_2 - p_2 v_2$; і $v = V/m$. Маса пари та води в барабані котла в момент розпалювання та при досягненні тиску $p_2 = 5,0$ МПа визначають за співвідношеннями $m_{\text{пi}} = m x_i$ і $m_{\text{вi}} = m(1 - x_i)$, в які підставляють відповідні значення x_i . Таким чином, розв'язання зводиться до знаходження параметрів стану робочого тіла, що міститься в барабані котла.

При використанні таблиць діють наступним чином.

1. Розраховують питомий об'єм вмісту барабана котла, який залишається незмінним в процесі: $v = 18,5 / (0,5 \cdot 10^3) = 37 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.
2. З таблиць «Суха насичена водяна пара та вода на лінії насичення (за тиском)» за тиском $p_1 = 3,5$ МПа знаходять $v'_1 = 1,2345 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, $v''_1 = 57,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$. Так як $v'_1 < v < v''_1$, то пара волога насичена. Температура насичення $t_{\text{нi}} = 242,54$ °С.
3. Розраховують ступінь (міру) сухості пари на початку розпалювання: $x_1 = (v - v'_1) / (v''_1 - v'_1) = (37 \cdot 10^{-3} - 1,2345 \cdot 10^{-3}) / (57,04 \cdot 10^{-3} - 1,2345 \cdot 10^{-3}) \approx 0,64$.
4. За таблицею та умовами, що вказані в п.2, визначають: $h'_1 = 1049,8$ кДж/кг; $h''_1 = 2803$ кДж/кг; $s'_1 = 2,725$ кДж/(кг К); $s''_1 = 6,125$ кДж/(кг К);

5. Розраховують параметри вологої пари в барабані котла на початку розпалювання: $h_1 = h_1''x_1 + h_1'(1-x_1)$; $h_1 = 2803 \cdot 0,64 + 1049,8 \cdot (1-0,64) \approx 2172$ кДж/кг;
 $s_1 = s_1''x_1 + s_1'(1-x_1)$; $s_1 = 6,125 \cdot 0,64 + 2,725(1-0,64) \approx 4,901$ кДж/(кг К); $u_1 = h_1 - p_1 v_1$;
 $u_1 = 2175 - 35 \cdot 10^2 \cdot 37 \cdot 10^{-3} \approx 2042$ кДж/кг.
6. Розраховують масу води та сухої насиченої пари в барабані котла
 $m_{в1} = m(1-x_1) = 0,5 \cdot 10^3 (1-0,64) = 0,18 \cdot 10^3$ кг; $m_{п1} = mx_1 = 0,5 \cdot 10^3 \cdot 0,64 = 0,32 \cdot 10^3$ кг.
7. З таблиць, які вказані в п.2, за тиском $p_2 = 5,0$ МПа знаходять
 $v_2' = 0,0012857$ м³/кг; $v_2'' = 0,03944$ м³/кг; $h_2' = 1154,4$ кДж/кг; $h_2'' = 2794$ кДж/кг;
 $s_2' = 2,921$ кДж/(кг К); $s_2'' = 5,973$ кДж/(кг К). Так як $v_1' < v < v_1''$, то пара волога насичена. Температура насичення $t_{н2} = 263,91$ °С.
8. Розраховують ступінь (міру) сухості пари при тиску в барабані $p_2 = 5,0$ МПа:
 $x_2 = (v - v_2') / (v_2'' - v_2') = (37 \cdot 10^{-3} - 1,2857 \cdot 10^{-3}) / (39,44 \cdot 10^{-3} - 1,2857 \cdot 10^{-3}) \approx 0,94$.
9. Розраховують параметри вологої пари в барабані котла при $p_2 = 5,0$ МПа так, як це було зроблено в п.5: $h_2 = 2696$ кДж/кг; $s_2 = 5,790$ кДж/(кг К); $u_2 = 2511$ кДж/кг.
10. Розраховують масу води та сухої насиченої пари в барабані котла так, як це було зроблено в п.6: $m_{п2} = 470$ кг; $m_{в2} = 30$ кг.
11. Розраховують час розпалювання котла: $\tau = m(u_2 - u_1) / Q_{IT}$; $\tau = 0,5 \cdot 10^3 \times (2511 - 2042) / 300 \cdot 60 \approx 13$ год.

При використанні діаграми діють так:

1. Розраховують питомий об'єм вмісту барабану котла, який залишається незмінним в процесі: $v = 37 \cdot 10^{-3}$ м³/кг.
2. Знаходять точку 1 на перетині ізохори $v = 37 \cdot 10^{-3}$ м³/кг з ізобарою $p_1 = 3,5$ МПа та визначають параметри пари в цій точці: $x \approx 0,64$;
 $h_1 \approx 2170$ кДж/кг; $s_1 \approx 4,9$ кДж/(кг К); $u_1 = h_1 - p_1 v_1$; $u_1 \approx 2040$ кДж/кг.
3. По лінії $v = \text{const}$ піднімаються до перетину з ізобарою $p_2 = 5,0$ МПа і в точці перетину 2 визначають параметри пари:
 $x_2 = 0,94$; $h_2 = 2696$ кДж/кг;
 $s_2 = 5,790$ кДж/(кг К); $u_2 = h_2 - p v_2$; $u_2 = 2511$ кДж/кг.

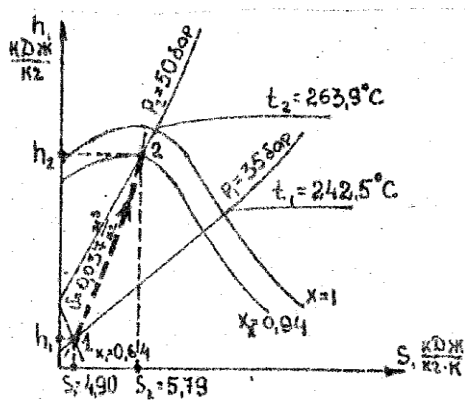


Рис. 6.2. До прикладу 6.4.

4. Температуру пари в початковий та кінцевий моменти визначають за ізотермами, які проходять через точки перетину з верхньою пограничною кривою ($x = 1$) ізобар $p_1 = 3,5$ МПа та $p_2 = 5,0$ МПа; $t_{н1} = 241$ °С; $t_{н2} = 264$ °С.

5. Визначають маси води та сухої насиченої пари в барабані котла (див. п.6 розв'язання за допомогою таблиць) $m_{п1} = 320$ кг; $m_{в1} = 180$ кг; $m_{п2} = 470$ кг; $m_{в2} = 30$ кг.

6. Розраховують час розпалювання котла (див.п.11 розв'язання за допомогою таблиць): $\tau = 0,5 \cdot 10^3 (2507 - 2040) / (300 \cdot 60) \approx 13$ хв. Помітний добрий збіг результатів при використанні таблиць та діаграми. Процес в h,s - координатах зображений на рис. 6.2.

Відповідь: час розпалювання котла становить 13 хв.

Приклад 6.5. Для одного кілограма пари, яка змінює свій стан в ізотермічному процесі від стану, що характеризується тиском 1,0 МПа і ступенем (мірою) сухості 0,9, до тиску 0,2 МПа, визначити кількості роботи та теплоти процесу, зміну внутрішньої енергії пари, а також встановити, як відбувається цей процес: з підведенням чи з відведенням теплоти, із зростанням чи зменшенням об'єму пари. Розрахунок здійснити з використанням таблиць та h,s - діаграми водяної пари. Зобразити процес в h,s - координатах.

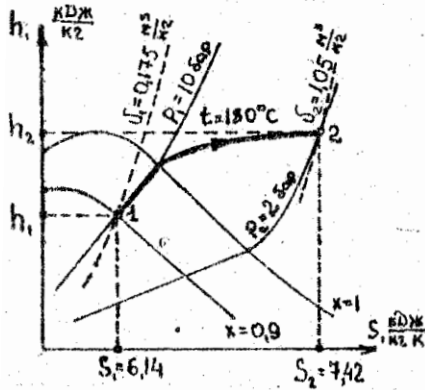
Розв'язання. Згідно з Першим законом термодинаміки $q = \Delta u + l$. В ізотермічному процесі кількість теплоти процесу $q = T(s_2 - s_1)$. Оскільки $u = h - pv$, то зміна внутрішньої енергії $\Delta u = h_2 - h_1 + (p_1 v_1 - p_2 v_2)$. Робота процесу $l = q - \Delta u$. Таким чином, розв'язування зводиться до знаходження параметрів пари в початковому та кінцевому станах процесу.

При використанні таблиць діють наступним чином.

1. З таблиці «Суха насичена пара та вода на лінії насичення (за тиском)» за тиском 1,0 МПа знаходять: $t_n = 179,88$ °С; $v_1' = 1,1273 \cdot 10^{-3}$ м³/кг; $v_1'' = 0,1946$ м³/кг; $h_1' = 762,7$ кДж/кг; $h_1'' = 2778$ кДж/кг; $s_1' = 2,138$ кДж/(кг К); $s_1'' = 6,587$ кДж/(кг К).
2. Розраховують за співвідношенням $z = z''x + z'(1 - x)$, де z – будь-який з параметрів v, h, s , значення цих параметрів в початковому стані для пари: $v_1 = 0,175$ м³/кг; $h_1 = 2576$ кДж/кг; $s_1 = 6,14$ кДж/(кг К).
3. З таблиці «Вода і перегріта водяна пара» за тиском $p_2 = 0,2$ МПа та температурою $t_2 = 180$ °С знаходять: $v_2 = 1,032$ м³/кг; $h_2 = 2830$ кДж/кг; $s_2 = 7,415$ кДж/(кг К).
4. Розраховують зміну внутрішньої енергії пари $\Delta u = 2830 - 2576 + (10 \cdot 0,175 - 2 \cdot 1,032)10^2 \approx 222$ кДж/кг.
5. Розраховують кількість теплоти процесу $q = 453(7,415 - 6,14) = 578$ кДж/кг. Процес відбувається з підведенням теплоти.
6. Розраховують роботу процесу $l = 578 - 222 = 356$ кДж/кг. Так як робота додатна, то пара розширюється.

При використанні діаграми діють так.

1. Знаходять на діаграмі точку 1 перетину ізобари $p_1 = 1,0$ МПа і лінії $x_1 = 0,9$. Визначають параметри пари в цій точці: $v_1 = 0,175 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_1 = 2570 \text{ кДж/кг}$; $s_1 = 6,14 \text{ кДж/(кг К)}$.
2. Знаходять точку перетину ізобари $p_1 = 0,1$ МПа і лінії $x_1 = 1$ та визначають температуру насичення для стану 1, яка в процесі залишається постійною: $t_n = 180^\circ\text{C}$. По ізотермі $t_n = 180^\circ\text{C}$ переміщуються до перетину з ізобарою $p_2 = 0,2$ МПа в точці 2 і знаходять параметри пари в цьому стані: $v_2 = 1,05 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_2 = 2828 \text{ кДж/кг}$; $s_2 = 7,42 \text{ кДж/(кг К)}$.



3. Проводять розрахунки за пп. 4, 5, 6 розв'язку з використанням таблиць. При цьому $\Delta u = 223 \text{ кДж/кг}$; $q = 580 \text{ кДж/кг}$; $l = 357 \text{ кДж/кг}$. Збіг результатів при використанні таблиць і h,s -діаграми добрий. Процес в h,s -координатах зображений на рис.6.3. Треба звернути увагу на те, що в ізотермічних процесах з водяною парою $\Delta u \neq 0$.

Рис. 6.3. До прикладу 6.5.

Відповідь: $\Delta u = 223 \text{ кДж/кг}$; $q = 580 \text{ кДж/кг}$; $l = 357 \text{ кДж/кг}$.

Приклад 6.6. Водяна пара на вході в турбіну має параметри $p_1 = 13$ МПа і $t_1 = 560^\circ\text{C}$. В проточній частині турбіни вона адіабатно розширюється до тиску $p_2 = 0,004$ МПа. Розрахувати потужність турбіни, якщо витрата пари $m = 10 \text{ кг/с}$; визначити зміну внутрішньої енергії пари та термодинамічну роботу, що здійснює пара в цьому процесі. Розрахунок провести, використовуючи таблиці та h,s -діаграму водяної пари. Зобразити процес в h,s -координатах.

Розв'язання. Потужність турбіни $N_T = l_T m$, де l_T – питома зовнішня корисна робота, яка здійснюється парою при її адіабатному розширенні в турбіні. Згідно з Першим законом термодинаміки $q = \Delta h + l_T = \Delta u + l$, де l – питома термодинамічна робота пари. Так як процес адіабатний, то $q = 0$, $l_T = -\Delta h = h_1 - h_2$, а $l = -\Delta u = u_1 - u_2$. Повна термодинамічна робота та зміна внутрішньої енергії пари в цьому процесі будуть відповідно $L = l m$ і $\Delta U = \Delta u m$. Необхідно пам'ятати, що $u = h - p v$. Таким чином, розв'язання зводиться до знаходження параметрів пари в початковому і в кінцевому станах.

При використанні таблиць діють наступним чином.

1. З таблиці «Вода та перегріта водяна пара» за тиском 13 МПа та температурою 560 °С знаходять: $v_1 = 0,02728 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_1 = 3493 \text{ кДж/кг}$; $s_1 = 6,638 \text{ кДж/(кг К)}$. Розраховують $u_1 \approx 3139 \text{ кДж/кг}$.

2. З таблиці «Суша насичена водяна пара та вода на лінії насичення (за тиском)» за тиском 4 кПа знаходять: $v'_2 = 1,0041 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $v''_2 = 34,81 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h'_2 = 121,4 \text{ кДж/кг}$; $h''_2 = 2554 \text{ кДж/кг}$; $h = 2433 \text{ кДж/кг}$; $s'_2 = 0,4225 \text{ кДж/(кг К)}$; $s''_2 = 8,473 \text{ кДж/(кг К)}$; $t_h = 29 \text{ °С}$.

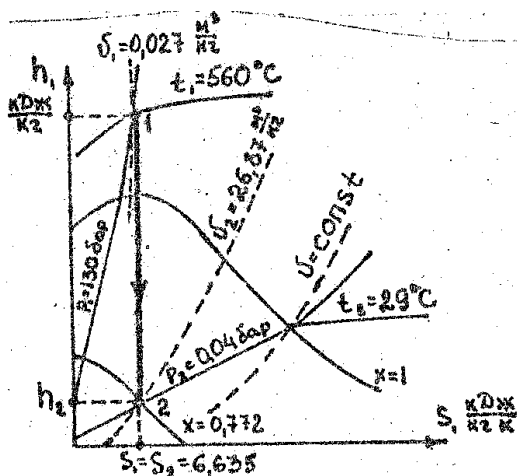
3. Розраховують значення параметрів в стані 2. Так як $s_1 = s_2 = s'_2 + rx/T_h'$, то $x = T_h(s_2 - s'_2)/r$; $h_2 = h'_2 + rx$; $v_2 = v'_2x + v''_2(1 - x)$; $u_2 = h_2 - p_2''v_2$. Підставляючи значення величин, отримують: $x = (302(6,638 - 0,4225))/2433 = 0,722$; $h_2 = 121,4 + 2433 \cdot 0,772 \approx 1999 \text{ кДж/кг}$; $v_2 = 34,81 \cdot 0,772 + 1,004 \cdot 10^{-3}(1 - 0,772) = 26,87 \text{ м}^3/\text{кг}$; $u_2 = 1999 - 4 \cdot 10^{-2} \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 26,87 \approx 1892 \text{ кДж/кг}$.

4. Розраховують потужність турбіни, термодинамічну роботу та зміну внутрішньої енергії пари в процесі: $N_m = (3433 - 1996) \cdot 10 \approx 14,94 \text{ МВт}$; $\Delta U = (1892 - 3139)10 \approx -12,47 \text{ МВт}$; $L = 12,47 \text{ МВт}$.

При використанні h,s -діаграми діють так.

1. В точці 1 перетину ізобари $p_1 = 13 \text{ МПа}$ та ізотерми $t_1 = 560 \text{ °С}$ знаходять: $v_1 = 0,027 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_1 = 3492 \text{ кДж/кг}$; $s_1 = 6,635 \text{ кДж/(кг К)}$. Розраховують $u_1 \approx 3141 \text{ кДж/кг}$.

2. Оскільки, процес розширення пари в турбіні ізоентропний ($s_1 = s_2$), то з точки 1 проводять лінію $s_1 = 6,635 \text{ кДж/(кг К)}$ до перетину її в точці 2 з



ізобарою $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$ та визначають в цій точці значення параметрів: $v_2 = 26 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h_2 = 1996 \text{ кДж/кг}$. Розраховують $u_2 \approx 1892 \text{ кДж/кг}$.

3. Розраховують потужність турбіни, термодинамічну роботу та зміну внутрішньої енергії пари в процесі: $L = 12,49 \text{ МВт}$; $N_T = (3492 - 1996)10 = 14,96 \text{ МВт}$; $\Delta U = (1892 - 3141)10 \approx -12,49 \text{ МВт}$.

Збіг результатів при використанні таблиць та h,s -діаграми добрий. Процес в h,s -координатах зображений на рис. 6.4.

Відповідь: за таблицею $N_T = 14,94 \text{ МВт}$; $\Delta U = -12,47 \text{ МВт}$; $L = 12,47 \text{ МВт}$; за діаграмою $N_T = 14,96 \text{ МВт}$; $\Delta U = -12,49 \text{ МВт}$; $L = 12,49 \text{ МВт}$.

Приклад 6.7. З барабану котла пара з параметрами $p_1 = 1$ МПа та $x_1 = 0,8$ надходить в пароперегрівач, де до неї підводиться кількість теплоти 1000 кДж/кг. Потім пара направляється в турбіну, де розширюється адіабатно. На виході ступінь (міра) сухості пари $x_2 = 0,95$. Витрата пари через турбіну $m = 10$ кг/с. Визначити параметри пари на вході та виході з турбіни, а також потужність турбіни. Розрахунок виконати, використовуючи таблиці та h,s -діаграму водяної пари. Зобразити процес в h,s -координатах.

Розв’язання. Потужність турбіни $N_T = l_T m$, де $l_T = h_2 - h_3$ – питома зовнішня корисна робота пари в процесі адіабатного розширення.

Таким чином, розв’язання зводиться до знаходження параметрів пари.

При використанні таблиць діють наступним чином.

1. З таблиці «Суха насичена водяна пара та вода на лінії насичення (за тиском)» за тиском $p_1 = 1$ МПа знаходять $h'_1 = 762,7$ кДж/кг і $h''_1 = 2778$ кДж/кг. Розраховують $h_1 = h''_1 x + h'_1 (1 - x)$; $h_1 = 2778 \cdot 0,8 + 762,7(1 - 0,8) \approx 2375$ кДж/кг.
2. Розраховують h_2 . Оскільки процес перегріву пари – ізобарний, то $q = h_2 - h_1$ і, відповідно, $h_2 = h_1 + q$; $h_2 = 2375 + 1000 = 3375$ кДж/кг. Оскільки $h_2 > h_1$, то пара на виході з пароперегрівача – перегріта.
3. З таблиці «Вода та перегріта водяна пара» за тиском $p_2 = p_1 = 1$ МПа та ентальпією $h_2 = 3375$ кДж/кг визначають: $t_2 \approx 452$ °С; $v_2 \approx 0,3313$ м³/кг; $s_2 \approx 7,621$ кДж/(кг К).
4. Процес розширення пари в турбіні – адіабатний. Отже, $s_3 = s_2 = 7,621$ кДж/(кг К). Оскільки пара на виході з турбіни волога насичена, то $s_3 = s''_3 x_3 + s'_3 (1 - x_3)$. В цьому рівнянні два невідомих – s'_3 і s''_3 , тому безпосереднє розв’язання за допомогою таблиць неможливе. Якщо відома аналітична залежність теплоти пароутворення від температури насичення $r(T_H)$, то останню можна розрахувати з рівняння $s_3 = 4,19 \ln(T_H/273) + x_3 r(T_H)/T_H$. Знаючи T_H , визначають h''_3 і h'_3 та розраховують $h_3 = h''_3 x_3 + h'_3 (1 - x_3)$.

Пара в турбіні не може бути охолоджена нижче температури навколишнього середовища. Тому гранично можливий тиск насичення практично не буде нижче 1 кПа, а ентропія сухої насиченої пари – більше $8,975$ кДж/кг. При тиску насичення до $0,1$ МПа ентропія киплячої води не перевищує $1,3$ кДж/(кг К). В даному випадку $s_3 \approx 7,621$ кДж/(кг К) і $x_3 = 0,95$. Отже, можна знехтувати величиною $s'_3 (1 - x_3)$ порівняно з $s''_3 x_3$.

Розраховують $s'_3 = s_3 / x_3$; $s'_3 = 7,621 / 0,95 = 8,022$ кДж/(кг К). З таблиці «Суха насичена пара та вода на лінії насичення (за тиском)» за зна-

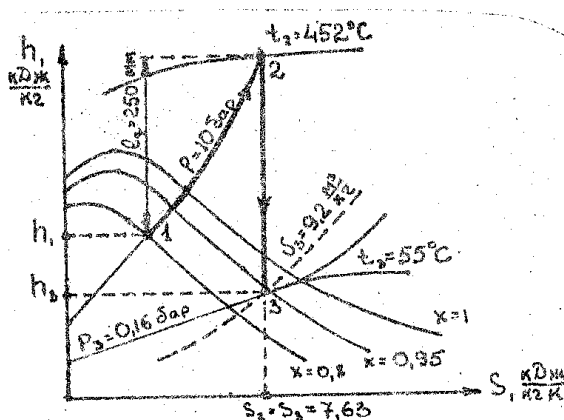
ченням s_3'' визначають: $p_3 = 0,0145 \text{ МПа}$; $h_3' = 223 \text{ кДж/кг}$; $h_3'' = 2597 \text{ кДж/кг}$; $v_3' = 0,00101 \text{ м}^3/\text{кг}$; $v_3'' = 10,34 \text{ м}^3/\text{кг}$; $t_3 \approx 53 \text{ }^\circ\text{C}$. Розраховують за співвідношенням $z_3 = z_3''x_3 + z_3'(1 - x_3)$ значення $h_3 \approx 2478 \text{ кДж/кг}$ і $v_3 \approx 9,82 \text{ м}^3/\text{кг}$.

5. Розраховують потужність турбіни: $N_T = (3375 - 2478)10 \approx 8,97 \text{ МВт}$.

При використанні діаграм діють так.

1. На перетині ізобари $p_1 = 1 \text{ МПа}$ і $x_1 = 0.8$ в точці 1 визначають $h_1 = 2372 \text{ кДж/кг}$.
2. Розраховують довжину відрізка $l_q = q/\mu_h$, де $\mu_h = 4 \text{ кДж/(кг мм)}$ – масштаб діаграми по вісі ентальпій; $l_q = 1000/4 = 250 \text{ мм}$.
3. З точки 1 відкладають вертикально вгору відрізок l_q та з його кінця проводять горизонталь до перетину з ізобарою $p_1 = 1 \text{ МПа}$ в точці 2. Визначають значення параметрів в точці 2: $t_2 = 452 \text{ }^\circ\text{C}$; $h_2 = 3372 \text{ кДж/кг}$; $v_2 \approx 0,34 \text{ м}^3/\text{кг}$; $s_2 = 7,63 \text{ кДж/(кг К)}$.

4. З точки 2 проводять вертикаль $s_2 = s_3 = \text{const}$ вниз до перетину її з лінією



$x_3 = 0,95$ в точці 3 та визначають значення параметрів пари в точці 3: $p_3 = 0,016 \text{ МПа}$; $h_3 = 2480 \text{ кДж/кг}$; $v_3 \approx 9,2 \text{ м}^3/\text{кг}$; $t_3 \approx 55 \text{ }^\circ\text{C}$. Збіг результатів з результатами наближеного визначення параметрів пари за таблицями задовільний.

5. Розраховують потужність турбіни:

$$N_T = (3372 - 2480)10 \approx 8,92 \text{ МВт}.$$

6. Процеси в координатах h,s зображені на рис.6.5.

Рис. 6.5. До прикладу 6.7.

Відповідь: потужність турбіни $N_T = 8,92 \text{ МВт}$.

Задачі

При розв'язанні запропонованих задач, доцільно попередньо побудувати процес в h,s -діаграмі (рис.6.6). Це дозволяє визначити стан робочого тіла та порядок числових значень його параметрів, полегшує вироблення ідеї та плану розв'язання задач.

Задача 6.1. На паропроводі встановлені термометр та манометр. Визначити за допомогою таблиць термодинамічних властивостей водяної пари на основі показань цих приладів стан пари та її основні параметри, якщо ба-

рометрний тиск $B = 0,1$ МПа: а) $p_m = 1,9$ МПа; $t = 250$ °С; б) $p_m = 0,9$ МПа; $t = 179,88$ °С.

Відповідь: пара: а) перегріта; б) суха насичена.

Задача 6.2. Визначити за допомогою таблиць термодинамічних властивостей стан водяної пари, який характеризують такі значення його параметрів: а) $p = 1,2$ МПа; $v = 0,18$ м³/кг; б) $p = 0,9$ МПа; $s = 6,52$ кДж/(кг К); в) $p = 2,9$ МПа; $v = 0,079$ м³/кг; г) $p = 1,5$ МПа; $t = 198,3$ °С.

Відповідь: пара: а) перегріта; б) волога насичена; в) перегріта; г) суха насичена.

Задача 6.3. Визначити за допомогою h,s -діаграми стан пари та її термічні і калоричні параметри, якщо: а) $p = 3$ МПа; $v = 0,08$ м³/кг; б) $p = 0,3$ МПа; $t = 133,5$ °С; в) $p = 3$ МПа; $h = 2700$ кДж/кг; г) $t = 300$ °С; $v = 2$ м³/кг; д) $t = 125$ °С; $s = 7,0$ кДж/(кг К); е) $t = 230$ °С; $x = 0,95$.

Відповідь: пара: а) перегріта; б) суха насичена; в) волога насичена; г) перегріта; д) суха насичена; е) волога насичена.

Задача 6.4. На виході з пароперегрівача парового котла пара має тиск 5 МПа і температуру 475 °С. В перегрівачі до пари підводиться кількість теплоти 800 кДж/кг. Вважаючи процес перегрівання пари ізобарним, визначити стан і параметри пари перед пароперегрівачем, а також здійснену паром термодинамічну роботу в процесі перегрівання. Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s . Зобразити процес в h,s -координатах.

Відповідь: початковий стан – пара волога насичена; $p = 5$ МПа; $t = 263,9$ °С; $x = 0,867$; $l \approx 157,9$ кДж/кг.

Задача 6.5. Водяна пара має температуру $t_1 = 350$ °С при тиску $p_1 = 1,5$ МПа. Визначити кількість теплоти, підведеної до 1 кг цієї пари при її ізотермічному розширенні до тиску $p_2 = 0,1$ МПа

Відповідь: $q \approx 810$ кДж/кг.

Задача 6.6. Водяна пара має температуру 350 °С при тиску 0,8 МПа. Визначити стан пари та її температуру після адіабатного розширення до тиску 0,05 МПа.

Відповідь: $t_2 = 82$ °С; $x_2 = 0,97$.

Задача 6.7. Використовуючи h,s -діаграму, визначити, яку кількість теплоти потрібно витратити аби перетворити: а) 1 кг води, яка має при тиску 0,7 МПа температура 100 °С, на 1 кг сухої насиченої пари такого ж тиску?; б) 1 кг сухої насиченої пари при тиску 2,8 МПа на перегріту пару, яка при

Відповідь: а) $q \approx 2340$ кДж/кг; б) $q \approx 320$ кДж/кг; в) $q \approx 520$ кДж/кг;
г) $q \approx 653$ кДж/кг.



Задача 6.8. Барабан котла має об'єм 10 м^3 . В барабані знаходиться $5 \cdot 10^3 \text{ кг}$ киплячої води при абсолютному тиску в барабані 15 МПа . Над поверхнею води знаходиться насичена пара з ступенем (мірою) сухості $x \approx 1$. Розрахувати масу пари в барабані.

Відповідь: $m_{\text{п}} = 172,9 \text{ кг}$.

Задача 6.9. В паровому котлі волога пара при абсолютному тиску $0,4 \text{ МПа}$ має питомий об'єм $v_x = 0,0155 \text{ м}^3/\text{кг}$. Яку питому кількість теплоти слід підвести до цієї пари, аби збільшити її тиск до $2,5 \text{ МПа}$?

Відповідь: $q = 626,3 \text{ кДж/кг}$.

Задача 6.10. В барабані котла знаходиться 500 кг вологої водяної пари з абсолютним тиском $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$ і ступенем (мірою) сухості $x = 0,95$. Визначити, яку кількість теплоти необхідно підвести до пари в котлі при закритих клапанах (засувках), аби збільшити тиск пари на 20% . Якою буде кінцева температура пари та в якому стані буде пара? Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s . Зобразити процес в h,s -координатах.

Відповідь: пара буде перегрітою; $t_{\text{пп}} \approx 156 \text{ }^\circ\text{C}$; $Q = 90,8 \text{ МДж}$.

Задача 6.11. Водяна пара розширюється ізотермічно. Визначити роботу розширення та зміну внутрішньої енергії пари, якщо в початковому стані тиск пари $1,5 \text{ МПа}$ і ступінь (міра) сухості $0,85$, а в процесі розширення до пари підведена кількість теплоти 950 кДж/кг . Маса пари 1 кг . В якому стані буде пара в кінці розширення? Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s . Зобразити схему енергобалансу процесу та процес в h,s -координатах.

Відповідь: пара перегріта; $\Delta u \approx 325 \text{ кДж/кг}$; $l \approx 625 \text{ кДж/кг}$.

Задача 6.12. Визначити витрату пари через проточну частину турбіни потужністю 10 МВт , якщо на вхід турбіни поступає пара з параметрами $p_1 = 4 \text{ МПа}$ і $t_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, яка адіабатно розширюється в проточній частині до тиску $p_2 = 40 \text{ кПа}$. Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s . Зобразити процес в h,s -координатах.

Відповідь: $m_{\text{п}} \approx 49 \text{ т/год}$.

Задача 6.13. До 1 кг водяної пари з параметрами $p_1 = 3 \text{ МПа}$ і $x_1 = 0,85$ підводиться ізобарно кількість теплоти 600 кДж/кг , а потім ще 1000 кДж/кг ізотермічно. Знайти кінцевий тиск пари та термодинамічну роботу, яку здійснює пара в цих двох процесах. Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s . Зобразити процеси в h,s -координатах.

Відповідь: $p_3 \approx 120 \text{ кПа}$; $l_{12} \approx 105 \text{ кДж/кг}$; $l_{23} \approx 961,4 \text{ кДж/кг}$.

Задача 6.14. В таблиці наведені значення параметрів водяної пари в двох станах 1 і 2. Визначити за допомогою таблиць водяної пари і h,s -діаграми, в якому з цих двох станів ентальпія пари буде більшою. Поясніть відповідь зображенням станів в h,s -координатах.

Стан	А		Б		В		Г		Д	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
x	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	-	-
P , МПа	15	5	5	0,5	-	-	-	-	20	1
t , °С	-	-	-	-	350	250	250	150	500	450

Відповідь: А, $h_2 > h_1$; Б, $h_1 > h_2$; В, $h_2 > h_1$; Г, $h_1 > h_2$; Д, $h_2 > h_1$.

Задача 6.15. Визначити за допомогою h,s -діаграми теплоту пароутворення r при тисках p від 0,1 МПа до 2,5 МПа через кожні 0,1 МПа та побудувати графік залежності r від p . Порівняти його з аналогічним графіком, побудованим за допомогою таблиць.

Вказівка 1. Кожен студент розраховує одну точку графіка, прийнявши, що тиск дорівнює відповідно до порядкового номеру прізвища студента в журналі академічної групи, та будує графік, обмінявшись даними розрахунку з іншими студентами групи.

Вказівка 2. При визначенні r за h,s -діаграмою скористатися співвідношеннями $h_{x_1} = h' + rx_1$ і $h_{x_2} = h' + rx_2$.

Задача 6.16. Яким повинен бути діаметр паропроводу, щоб забезпечити витрату пари m , яка рухається зі швидкістю w , якщо параметри пари відомі. Вихідні дані для розрахунку вибрати з таблиці П.2.8 додатку. Розв'язати задачу за допомогою таблиць водяної пари.

Задача 6.17. Початковий стан водяної пари характеризується тиском $p_1 = 0,5$ МПа (0,4 МПа) і температурою $t_1 = 300$ °С (250 °С). В цю пару впорскується кипляча вода такого ж тиску. В результаті пара стає сухою насиченою, але її тиск при цьому не змінюється. Визначити кількість води, що впорскується на 1 кг пари, і роботу, яка здійснюється в цьому процесі, а також зобразити процес в h,s -координатах. Задачу розв'язати за допомогою таблиць і діаграми h,s .

Відповідь: $m_v \approx 150$ г ($m_v \approx 154$ г); $L \approx -45,86$ кДж ($-48,53$ кДж).

Задача 6.18. В паровому котлі, що має об'єм 15 м^3 (5 м^3), міститься $7 \cdot 10^3$ кг ($3 \cdot 10^3$) кг суміші киплячої води та сухої насиченої пари при тиску 1 МПа (0,2 МПа). Яку кількість теплоти необхідно підвести до суміші в котлі при закритих засувках (пара від котла не відводиться), щоб тиск піднявся до

6 МПа (2 МПа)? Скільки води випаровується при цьому? Визначити час, який необхідний для підняття тиску в котлі, якщо до суміші підводиться тепловий потік 0,3 МВт (0,4 МВт). Зобразити процес в h,s -координатах. Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s .

Відповідь: $Q_v = 3301,2$ МДж (1226,4 МДж); $\tau \approx 184$ (51) хвилин.

Задача 6.19. В барабані парового котла знаходиться пароводяна суміш, маса якої $m = 1 \cdot 10^4$ кг. Параметри суміші: тиск $p_1 = 2$ МПа, ступінь (міра) сухості $x = 0,02$. Ця суміш підігрівається при закритих засувках на паровій магістралі та лінії живильної води, поки тиск в барабані не досягне $p_2 = 5$ МПа. Тепловий потік, спрямований від топкових газів до суміші в барабані, дорівнює при нагріванні 350 кВт. За який час буде досягнуто тиск p_2 , якщо знехтувати втратами теплоти при підігріванні суміші?

Відповідь: тривалість розпалювання $\tau = 2$ год. 12 хв.

Задача 6.20. В закритій посудині міститься 1 м^3 сухої насиченої водяної пари під тиском $p_1 = 1$ МПа. При охолодженні температура пари зменшується до $t_2 = 60$ °С. Визначити тиск пари, її ступінь (міру) сухості після охолодження, а також кількість теплоти, яка відводиться від пари.

Відповідь: $p_2 = 0,0199$ МПа; $x_2 = 0,0253$; $Q \approx -11,7$ МДж/м³.

Задача 6.21. Паропродуктивність котельного агрегату 25 т/год перегрітої пари з параметрами $p = 13$ МПа і $t = 560$ °С. Розрахувати кількість теплоти (теплову потужність), яку витрачено на перегрівання пари в пароперегрівачі, якщо перед надходженням пари в перегрівач вона має ступінь сухості $x = 0,98$. Втратами теплоти в перегрівачі знехтувати.

Відповідь: $Q \approx 6,06$ МВт.

Задача 6.22. Використовуючи h,s -діаграму водяної пари визначити: а) густину сухої насиченої пари при тиску 1 МПа; б) величину перегріву пари при тиску 1 МПа і температурі 300 °С; в) величину перегріву пари при тиску 0,8 МПа і температурі 250 °С; г) яку кількість теплоти необхідно витратити на перетворення 1 кг води, яка має температуру 0 °С на перегріту водяну пару з температурою 360 °С при тиску 2 МПа?

Відповідь: а) $\rho = 5$ кг/м³; б) $\Delta t \approx 120$ °С; в) $\Delta t = 80$ °С; г) $q \approx 3160$ кДж/кг.

Задача 6.23. В процесі ізотермічного розширення до 1 кг водяної пари підводиться кількість теплоти 625 (632) кДж/кг. Початковий стан пари характеризується тиском $p_1 = 3$ (5) МПа та ступенем (мірою) сухості 0,6 (0,85). Визначити стан пари в кінці розширення, термодинамічну роботу та зміну

внутрішньої енергії пари в цьому процесі. Зобразити процес в h,s -координатах та схему його енергобалансу. Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s .

Відповідь: пара волога насичена, $\Delta u \approx 557,5$ кДж/кг, $l = 67,5$ кДж/кг; пара перегріта, $\Delta u \approx 332$ кДж/кг, $l \approx 300$ кДж/кг.

Задача 6.24. Водяна пара здійснює адіабатний процес. Деякі параметри початкового та кінцевого станів пари відомі. Визначити основні термічні та калоричні параметри пари в початковому та кінцевому станах, термодинамічну та зовнішню корисну роботу пари в цьому процесі, а також зобразити процес в h,s -координатах. Вихідні дані для розрахунку вибрати з таблиці П.2.9 додатку. Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s .

Задача 6.25. Водяна пара, параметри початкового стану якої відомі, здійснює послідовно два процеси 1-2 і 2-3. Визначити основні термічні та калоричні параметри пари в характерних точках 1, 2, 3, роботу та кількість теплоти цих процесів та зобразити процеси в h,s -координатах. Вихідні дані для розрахунку вибрати з таблиці П.2.10 додатку. Розв'язати задачу за допомогою таблиць і діаграми h,s .

2.7. ВЛАСТИВОСТІ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ І АНАЛІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ

Мета – отримати знання про властивості вологого повітря, сформувані вміння розрахунку процесів вологого повітря.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Приступаючи до розв'язання завдань цього розділу, необхідно знати: основні положення термодинаміки вологого повітря; визначення всіх параметрів вологого повітря як тепло- і вологоносія, одиниці величин в СІ, що використовуються в практиці застосування вологого повітря в техніці; фізичну сутність кожного параметра, визначальні і розрахункові формули для обчислення параметрів; методи і засоби для визначення вологості повітря; принципи побудови і вигляд h,d -діаграми станів вологого повітря, визначення параметрів повітря по h,d -діаграмі (бажана наявність у студентів електронної версії h,d -діаграми); побудову таблиць термодинамічних властивостей водяної пари і правила користування ними (дивись 2.6); фізичну сутність і зображення основних процесів зміни стану вологого повітря в h,d -діаграмі (рекуперативного нагрівання та охолодження, ізобарно-адіабатичного і політропного випаровування води в повітря, змішування повітря різних станів; зволоження повітря парою і водою), формули для розрахунку параметрів суміші вологого повітря різних станів; метод обчислення кутових коефіцієнтів і способи нанесення їх на поле h,d -діаграми; кутовий масштаб і транспортир; методи і прилади для визначення вмісту вологи в повітрі.

Рекомендована література: [1.1], [1.2], [1.4], [3.1], [3.2], [3.6].

Рекомендації до вивчення матеріалу по темі

Вологе нагріте повітря – найбільш широко застосовуване робоче тіло – суміш сухого повітря і водяної пари. Розглядаючи у p,v -діаграмі область можливих станів водяної пари, яка знаходиться у вологому повітрі, необхідно розібратися з можливими станами вологого повітря (ненасичене, насичене, пересичене), звернувши увагу на те, що температура повітря може бути як вище, так і нижче температури насичення водяної пари при барометричному тиску B , тобто $t \geq t_n(B)$.

Слід запам'ятати, що згідно з правилом фаз Гіббса для однозначної характеристики рівноважного стану однофазної двокомпонентної суміші, якою

є вологе повітря, необхідно знати будь-які три з її термодинамічних параметрів.

Треба вивчити словесні та аналітичні визначення параметрів стану вологого повітря, усвідомити їх фізичну сутність і специфіку, звернувши увагу на те, що такі параметри, як вологовміст, ентальпія, ентропія, питомий об'єм, відносять до маси сухого повітря; з'ясувати межі області застосування законів ідеальних газів до вологого повітря як суміші сухого повітря і водяної пари. Це особливо важливо знати при встановленні аналітичних зв'язків між параметрами вологого повітря. Проаналізувати вплив змін температури та вмісту вологи повітря на його густину; звернути увагу на особливості розрахунку ентальпії вологого повітря, зокрема ентальпії водяної пари, що міститься у вологому повітрі; усвідомити поняття активної складової і баласту ентальпії вологого повітря.

Корисно запам'ятати, що питому масову ізобарну теплоємність вологого повітря наближено (з похибкою менше 1%) для діапазону зміни температури 0-100 °С і тиску менше 1 МПа можна розраховувати за формулою $c_{p,вп} \approx 1 + 2d$, кДж/(кг К), у якій 1 і 2 – наближені значення питомих теплоємностей сухого повітря та перегрітої водяної пари; d – вологовміст повітря у кілограмах водяної пари на кілограм сухого повітря.

Слід розібратися в суті: процесу адіабатного насичення повітря у замкненому обмеженому об'ємі і поняття температури межі адіабатичного насичення (температури мокрого термометра); процесу адіабатичного випаровування рідини в потік повітря; теоретичного обґрунтування однозначної залежності $\phi = \phi(t, \epsilon)$, на існуванні якої базується принцип роботи психрометру; розібратися у методиці обчислення значень параметрів вологого повітря за допомогою таблиць термодинамічних властивостей водяної пари. Необхідно звернути увагу на те, що потенціал сушіння ϵ характеризує здатність повітря до випаровування в нього води і відображає спільний вплив температури і вологовмісту повітря на процес сушіння, а відносна вологість ϕ повітря служить тільки якісною характеристикою його вологості. Ступінь насичення вологого повітря $\Psi = d/d_{\max}$ пов'язана з відносною вологістю ϕ співвідношеннями: $\psi = \phi(B - p_n) / (B - p_n) = \phi(0,622 + d) / (0,622 + d_{\max})$.

Треба усвідомити принцип побудови h, d -діаграми вологого повітря, звернувши увагу на наступне: діаграма може бути побудована для будь-якої парогазової суміші при довільному, але конкретному значенні тиску B ; для кращого використання площі діаграми вона побудована в косокутній системі координат; на діаграмі є тільки одна лінія залежності p_n парціальних тисків водяної пари у повітрі від вологовмісту, а шкала значень p_n може бути нане-

сена або у правому нижньому куті діаграми, або на лінії, паралельній допоміжній горизонтальній осі d ; лінії-ізогідри $\varphi = \text{const}$ різко змінюють свій характер (вигляд) при температурі повітря, що дорівнює температурі насичення водяної пари для даного B ; лінії-ізотерми зі збільшенням температури повітря йдуть крутіше; лінії випаровування при постійних температурах мокрого термометра нанесені штриховими і не паралельні лініям $h = \text{const}$; при зміні B положення ізотерм не змінюється, а лінії $\varphi = \text{const}$ деформуються, причому $\varphi_1/\varphi_2 = B_1/B_2$ при відхиленні B від зазначеного на діаграмі значення на величину $\Delta B \leq \pm 15$ мм рт.ст. (1999,83 Па), а похибка у визначенні значень параметрів по діаграмі при тиску ($B \pm \Delta B$) не перевищує 5%.

Слід вивчити методику визначення параметрів вологого повітря по h,d -діаграмі; усвідомити сутність процесів, що протікають у вологому повітрі при нагріванні його в калорифері, при адіабатичних випаровуванні у повітря вологи і змішуванні повітря різних станів; слід звернути увагу на те, що зволоження повітря сухою насиченою парою (бажано барометричного тиску) підвищує температуру і вологовміст повітря, а зволоження навіть гарячою розпилюваною водою призводить до зниження температури суміші. При адіабатичних процесах рекомендується застосовувати тонкий розпил води, а при політропічних – грубий. Зволоження повітря вологою насиченою парою подібне до використання одночасно сухої насиченої пари і розпилювання відповідної кількості води з температурою пари; необхідно розібратися в аналітичному описі цих процесів і зображенні їх в h,d -діаграмі.

При вивченні змішування повітря різних станів необхідно усвідомити поняття коефіцієнта рециркуляції n і його вплив на розташування точки, яка характеризує стан суміші в h,d -діаграмі; запам'ятати аналітичні співвідношення для розрахунку параметрів суміші; вивчити особливості визначення параметрів суміші в разі, коли при побудові лінії процесу змішування на h,d -діаграмі вона перетинає граничну криву $\varphi = 100$ %. Простота використання, швидкість і достатня для технічних розрахунків точність визначення параметрів стану за h,d -діаграмою забезпечили її широке застосування у практиці розрахунків процесів сушіння, кондиціонування, вентиляції. Вміння та навички вільного користування h,d -діаграмою необхідні при розв'язуванні задач.

При розрахунках сушильних установок використовують h,d -діаграму Л.К.Рамзіна (складена в 1918 р.) та h,x -діаграму Р.Мольє (складена в 1923 р.) де $x = 10^3 d$. Принципова відмінність цих діаграм обумовлена видом визначальних рівнянь для ізогідр. У h,d -діаграмі Л.К. Рамзіна вигляд визначального рівняння для ліній $\varphi = \text{const}$ залежить від температури повітря: при $t < t_n(B)$, де B – тиск, для якого побудовано діаграму, $\varphi = p_n/p_n(t)$; при $t \geq t_n(B)$ прийня-

то $\phi = p_{\text{п}} / B$. У діаграмі Р. Мольтє $\phi = p_{\text{п}} / p_{\text{н}}(t)$ у всьому інтервалі температур вологого повітря.

Слід також пам'ятати, що за визначенням $\phi = \rho_{\text{п}}(p_{\text{п}}; t) / \rho_{\text{н}}(t)$.

Питання для самоконтролю знань

1. Що називають вологим повітрям? Яке повітря вважають ненасиченим, насиченим і пересиченим (туманом)?
2. Які параметри вологого повітря характеризують його як теплоносії, а які – як вологоносії? Назвіть одиниці цих величин.
3. Визначте поняття «вологівміст вологого повітря»; які максимальні значення може приймати вологовміст і в яких випадках?
4. Визначте поняття «абсолютна і відносна вологість вологого повітря». Чому, якщо $t > t_{\text{н}}(B)$ для водяної пари, відносна вологість ϕ буде залежати тільки від вмісту вологи?
5. Які методи визначення параметрів, що характеризують ступінь зволоження повітря, ви знаєте? Сформулюйте і запишіть правило фаз Гібса.
6. Чому вологе повітря можна вважати з достатнім ступенем точності сумішшю ідеальних газів? Яким може бути максимальний тиск водяної пари в цій суміші? Які при цьому повинні дотримуватися умови?
7. Що таке температура точки роси і як її можна визначити?
8. Що таке температура мокрого термометра? Чому її можна називати температурою межі адіабатичного насичення вологого повітря? Що називається потенціалом сушіння?
9. Поясніть суть відмінностей понять «температура мокрого термометра» і температура «мокрого» термометра психрометра. Як цю відмінність можна усунути?
10. Розкрийте зміст величини «ентальпія вологого повітря». Її одиниці в СІ? Який член у співвідношенні для розрахунку питомої ентальпії вологого повітря визначає: розбіжність на h, d -діаграмі ізотерм віялом вгору; ентальпію перегрітої пари?
11. Що являють собою активна частина і баласт ентальпії вологого повітря? Як підраховують ці складові ентальпії?
12. Як розрахувати об'єм вологого повітря, що припадає на 1 кг сухого повітря? Яке повітря легше: менш вологе або більш вологе – і чому?
13. Як можна розрахувати густину вологого повітря? Яке повітря має більшу густину: ненасичене ($\phi < 100\%$), чи насичене ($\phi = 100\%$)?

14. За якою температурою вологого повітря можна визначити або підрахувати парціальний тиск водяної пари, що міститься в повітрі, при заданому барометричному тиску?
15. Поясніть принцип побудови h,d -діаграми станів вологого повітря. З якою метою діаграму побудовано в косокутній системі координат?
16. Зобразіть схематично h,d -діаграму вологого повітря, звернувши увагу на характер і взаємне розташування основних ліній. Чим пояснюється різкий перелом ліній $\phi = \text{const}$ при температурі $99,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на h,d -діаграмі, побудованій для $B = 745\text{ мм рт.ст.}$?
17. Задайте точкою на h,d -діаграмі стан вологого повітря і визначте по діаграмі параметри цього стану повітря.
18. Що таке теоретичний процес випаровування води у вологе повітря? Чому процес випаровування вологи з об'єкта сушіння в ідеальній сушильній установці зображується в h,d -діаграмі лінією $h = \text{const}$?
19. Як зображується в h,d -діаграмі процес нагрівання (охолодження) вологого повітря в калорифері (рекуперативному теплообміннику)? Як підрахувати кількість підведеної (відведеної) до повітря енергії у формі теплоти в калорифері? Чи можуть ізотерми в h,d -діаграмі утворювати тупий кут з допоміжною віссю d ?
20. Як зображується в h,d -діаграмі процес адіабатного змішування повітря різних станів? Що таке коефіцієнт рециркуляції і як впливає його значення на положення точки, що характеризує стан суміші, в h,d -діаграмі?
21. Як виміряти температури точки роси і мокрого термометра, які відповідають певному стану ненасиченого вологого повітря? Яка з них вище і чому?
22. Що таке вологоємність вологого повітря і як вона змінюється при підвищенні температури повітря?
23. Чим за визначенням відрізняються між собою параметри ϕ і ψ вологого повітря?
24. Як змінюється атмосферний тиск з підвищенням відносної вологості навколишнього повітря?
25. Чи можливо застосувати залежності, отримані для вологого повітря, що містить вологу в пароподібному стані, до перенасиченого вологою повітря?
26. На які дві області розділяє h,d -діаграму станів вологого повітря ізогідра насичення $\phi = 1$?
27. Чому нахил ізотерм на h,d -діаграмі станів вологого повітря збільшується з підвищенням температури? Поясніть і покажіть як трансформується h,d -

- діаграма станів вологого повітря (як змінюється положення основних ліній), якщо зміниться хімічний склад пари і питома теплоємність газу?
28. Побудуйте на h, d -діаграмі станів вологого повітря лінію, що відповідає значенню газової сталої вологого повітря $R_{\text{вп}} = \text{const}$.
 29. Визначте за допомогою h, d -діаграми станів вологого повітря всі параметри його за температурами: а) виміряними психрометром; б) виміряними за допомогою термометра і конденсаційного гігрометра; в) точки роси і межі адіабатичного насичення.
 30. Якими лініями на h, d -діаграмі станів вологого повітря зображуються процеси зволоження і осушення повітря?
 31. Чи можна організувати процес нагрівання повітря в приміщенні по лінії $\phi = \text{const}$? Чи можна охолоджувати повітря, зберігаючи незмінною його відносну вологість $\phi < 100\%$?
 32. Як за допомогою h, d -діаграми станів вологого повітря визначити параметри і умови, за яких в результаті змішування повітря різних станів буде виділятися крапельна волога?
 33. Як визначити температуру суміші повітря різних станів і кількість води, що сконденсувалася при змішуванні, за допомогою h, d -діаграми станів вологого повітря?
 34. Яка температура буде межею нагрівання або охолодження води при безпосередньому тепло- і вологообміні повітря з водою?
 35. Яку воду, холодну або гарячу, слід застосовувати для осушення повітря, а яку для його зволоження?
 36. Чи може при контактному тепло- і вологообміні повітря з водою знижуватися температура в обох середовищах?

Приклади

Приклад 7.1. Розрахувати температуру точки роси, парціальний тиск водяної пари, вологовміст, ентальпію, об'єм і густину вологого повітря, що знаходиться при $B = 745$ мм рт.ст. (0,0993 МПа) і має температуру $t = 30$ °С (303 К) і відносну вологість $\phi = 80\%$. Як зміняться результати розрахунку, якщо температура повітря зросте до $t = 120$ °С (393 К) при незмінному його вологовмісті?

Розв'язання. Випадок 1. Температура точки роси – це температура насичення водяної пари, що міститься у повітрі, при її парціальному тиску $p_{\text{п}}$. Отже, визначивши $p_{\text{п}}$, можна буде відповісти на усі питання задачі, оскільки, знаючи $p_{\text{п}}$ та B , можна розрахувати d , а за d і T – ентальпію h , $V_{\text{аі}}$ і $\rho_{\text{аі}}$. Співвідношення, що зв'язують шукані та задані величини, мають вигляд: $\phi =$

$= p_{\text{п}} / p_{\text{н}}(t); p_{\text{п}} = \phi p_{\text{н}}(t); t^{\text{п}} = t_{\text{н}}(p_{\text{п}}); d = 622 p_{\text{п}} / (B - p_{\text{п}}); h = c_{\text{сп}} t + 10^{-3} d(r_0 + c_{\text{п}} t); V_{\text{вп}} = 2,15 T / (B - p_{\text{п}}); \rho_{\text{вп}} = \rho_{\text{сп}} (1 + x) = (B / 287 - 0,00132 \phi p_{\text{н}}(t)) / T$. Послідовність розв'язування така.

За заданою температурою t по таблиці «Суха насичена пара і вода на лінії насичення (за температурами)» термодинамічних властивостей води і водяної пари знаходимо для $t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ тиск $p_{\text{н}} = 0,004241 \text{ МПа}$; потім обчислюємо парціальний тиск $p_{\text{п}} \approx 0,003393 \text{ МПа}$. По таблиці «Суха насичена пара і вода на лінії насичення (за тисками)» знаходимо для тиску $p_{\text{п}}$ відповідну температуру насичення, яка одночасно дорівнює температурі точки роси $t^{\text{п}} \approx 26,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Вологовміст $d = 622 \cdot 0,003393 / (0,0993 - 0,003393) \approx 22 \text{ г/кг сп}$. Ентальпія $h = 1 \cdot 30 + 22 \cdot 10^{-3} (2500 + 1,97 \cdot 30) \approx 86,3 \text{ кДж/кг сп}$. Об'єм вологого повітря $V_{\text{вп}} = 2,15 \cdot 303 / (745 - 25,45) \approx 0,905 \text{ м}^3/\text{кг сп}$ (у цій формулі значення B та $p_{\text{п}}$ виражено у міліметрах ртутного стовпчика). Густина вологого повітря $\rho_{\text{вп}} = \frac{10^6}{303} \left(\frac{0,0993}{287} - 0,00132 \cdot 0,8 \cdot 0,004241 \right) \approx 1,13 \text{ кг/м}^3$.

Випадок 2. Якщо температура вологого повітря вища за температуру насичення пари при заданому тиску B , то $\phi = p_{\text{п}} / B$. Отже, $\phi = (0,003393 / 0,0993) 100 \approx 3,42 \text{ \%}$ оскільки при $d = \text{const}$ буде і $p_{\text{п}} = \text{const}$. Ентальпія повітря $h = 1 \cdot 120 + 10^{-3} \cdot 22 (2500 + 1,97 \cdot 120) = 180,2 \text{ кДж/кг сп}$. Об'єм вологого повітря $V_{\text{вп}} = 2,15 \cdot 393 / (745 - 25,45) \approx 1,174 \text{ м}^3/\text{кг сп}$. Густина повітря $\rho_{\text{вп}} = \frac{10^6}{393} \left(\frac{0,0993}{287} - 0,00132 \cdot 0,0342 \cdot 0,19854 \right) \approx 0,857 \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: Випадок 1. $t^{\text{п}} \approx 26,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $p_{\text{п}} = 0,00339 \text{ МПа}$; $d \approx 22 \text{ г/кг сп}$; $h \approx 86,3 \text{ кДж/кг сп}$; $V_{\text{вп}} = 0,905 \text{ м}^3/\text{кг сп}$; $\rho_{\text{вп}} = 1,13 \text{ кг/м}^3$. Випадок 2. $t^{\text{п}} = 26,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $p_{\text{п}} = 0,003393 \text{ МПа}$; $d \approx 24,83 \text{ г/кг сп}$; $h \approx 180,2 \text{ кДж/кг сп}$; $V_{\text{вп}} = 1,174 \text{ м}^3/\text{кг сп}$; $\rho_{\text{вп}} = 0,857 \text{ кг/м}^3$.

Приклад 7.2. Визначити відносну вологість повітря при температурі $t = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску $B = 760 \text{ мм рт.ст}$, якщо його вологовміст $x = 0,07 \text{ кг/кг сп}$.

Розв'язання. При нормальному атмосферному тиску B насичена водяна пара не може мати температуру вище за $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому при температурі повітряно-парової суміші вище $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ пара, що міститься у повітрі, буде перегрітою, а у формулі для вологовмісту приймають $p_{\text{п}} = B$. Із співвідношення $x = 0,622 \phi B / (B - \phi B) = 0,622 \phi / (1 - \phi)$ випливає, що при даному вологовмісті x відносна вологість є сталою величиною і не залежить від температури. Тоді $0,07 = 0,622 \phi / (1 - \phi)$, звідки $\phi \approx 0,1$ або 10 \% .

Відповідь: $\phi = 10 \text{ \%}$.

Приклад 7.3. Парціальний тиск пари в атмосферному повітрі становить 0,02 МПа, температура повітря дорівнює 70 °С. Визначити відносну вологість і ступінь насичення повітря.

Розв'язання. Температурі 70 °С відповідає тиск насиченої пари $p_n = 0,03117$ МПа. Отже, при парціальному тиску $p_n = 0,02$ МПа пара є перегрітою. З таблиці термодинамічних властивостей «Вода і перегріта водяна пара» для $p_n = 0,02$ МПа і $t = 70$ °С питомий об'єм пари $v = 7,037$ м³/кг. Густина пари $\rho_n = 1/v = 0,127$ кг/м³. З таблиці «Суха насичена пара і вода на лінії насичення (за температурами)» для $t = 70$ °С густина насиченої пари $\rho_n = \rho'' = 0,1982$ кг/м³; звідси відносна вологість повітря $\phi = \rho_n / \rho_n = (0,127/0,1982)100 = 64,1$ %. Такий самий результат отримаємо, якщо з тієї ж самої таблиці при температурі $t = 70$ °С знайдемо тиск насичення $p_n = 0,03117$ МПа. Тоді $\phi = p_n / p_n$ і $\phi = (0,02/0,03117)100 = 64,2$ %. Ступінь насичення повітря $\psi = d / d_{\max}$, де вологовміст $d = 622 p_n / (B - p_n)$. При атмосферному тиску $B = 0,099325$ МПа, отримуємо: $d_{\max} = 622 \cdot 0,03117 / (0,099325 - 0,03117) \approx 284,5$ г/кг сп. Вологовміст $d = 0,622 \phi p_n / (B - \phi p_n)$; $d = 622 \times 0,641 \cdot 0,03117 / (0,099325 - 0,641 \cdot 0,03117) \approx 156,6$ г/кг.

Ступінь насичення $\psi = 156,6 / 284,5 \approx 0,55$.

Відповідь: $\phi = 64,1$ %; $\psi = 0,55$.

Приклад 7.4. Повітря атмосферного тиску при температурі 34 °С насичене водяною парою. Визначити парціальний тиск повітря, об'ємний і масовий вміст пари у повітряно-паровій суміші та її відносну масову концентрацію, вважаючи обидва компонента суміші ідеальними газами. Атмосферний тиск $B = 745$ мм рт.ст. Визначити густину повітряно-парової суміші та порівняти її з густиною сухого повітря.

Розв'язання. За таблицею «Суха насичена пара і вода на лінії насичення (за температурами)» знаходимо, що при $t = 34$ °С тиск насиченої водяної пари складає 39,9 мм рт.ст. Цей тиск є парціальним тиском водяної пари p_n у повітряно-паровій суміші, а парціальний тиск повітря дорівнює $p_{\text{пов}} = B - p_n$; $p_{\text{пов}} = 745 - 39,9 \approx 705$ мм рт.ст. Об'ємна частка водяної пари у суміші $r = p_n / B = 39,9/745 = 0,0535$; масова частка пари $g = \mu_n r / (\mu_n r + \mu_{\text{пов}} (1 - r))$, де $\mu_n = 18$ кг/кмоль – молекулярна маса пари; $\mu_{\text{пов}} = 29$ кг/кмоль молекулярна маса повітря; $g = 18 \cdot 0,0535 / (18 \cdot 0,0535 + 29 \cdot 0,9465) = 0,0339$. Відносна масова концентрація пари у повітряно-паровій суміші (вологовміст повітря)

$d = g/(1 - g)$; $d = 0,0339/0,9661 = 0,0351$ кг пари/кг сп. З іншого боку, вологовміст $d = 0,622 \phi p_{\text{н}} / (B - \phi p_{\text{н}})$; тоді $d = 622 \cdot 1 \cdot 39,9 / (745 - 1 \cdot 39,9) \approx 35,2$ г/кг сп.

Густину повітряно-парової суміші розраховуємо як суму густин компонентів, обраних кожен при своєму парціальному тиску: $\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{пов}} + \rho_{\text{п}} = T_0(\mu_{\text{пов}} p_{\text{пов}} + \mu_{\text{п}} p_{\text{п}}) / (22,4TB_0)$; $\rho_{\text{см}} = 273(29 \cdot 705 + 18 \cdot 39,9) / (22,4 \cdot 307 \cdot 760) = 1,105$ кг/м³. Густину суміші можна розрахувати інакше. Мольна маса суміші $\mu_{\text{см}} = \mu_{\text{п}} r + \mu_{\text{в}} (1 - r)$; $\mu_{\text{см}} = 18 \cdot 0,0535 + 29 \cdot 0,9465 = 28,4$ кг/моль. Густина суміші $\rho_{\text{см}} = \mu_{\text{см}} BT_0 / (22,4TB_0)$ при $t = 34$ °C і $B = 745$ мм рт.ст. буде $\rho_{\text{см}} = 28,4 \cdot 745 \cdot 273 / (22,4 \cdot 760 \cdot 307) = 1,105$ кг/м³. Густина сухого повітря при тих же самих тиску та температурі: $\rho_{\text{сп}} = \mu_{\text{пов}} BT_0 / (22,4TB_0)$, $\rho_{\text{сп}} = 29 \cdot 745 \times 273 / (22,4 \cdot 307 \cdot 760) = 1,13$ кг/м³.

Відповідь: $p_{\text{п}} = 39,9$ мм рт. ст.; $p_{\text{пов}} = 705$ мм рт. ст.; $r = 0,0535$; $g = 0,0339$; $d = 35,2$ г/кг сп; $\rho_{\text{см}} = 1,105$ кг/м³; $\rho_{\text{сп}} = 1,13$ кг/м³.

Приклад 7.5. Обчислити парціальні об'єми водяної пари, азоту, кисню і парціальні тиски азоту і кисню у вологому повітрі. Загальний об'єм суміші $V = 2 \cdot 10^{-3}$ м³, загальний тиск $p = 1,0132 \cdot 10^5$ Па, парціальний тиск водяної пари $p_{\text{H}_2\text{O}} = 1,233 \cdot 10^4$ Па. Склад повітря: 21 об'ємний відсоток O₂ і 79 об'ємних відсотків N₂.

Розв'язання. Обчислюємо парціальний об'єм водяної пари $v_{\text{H}_2\text{O}}$ за рівнянням: $v_{\text{H}_2\text{O}} p = V p_{\text{H}_2\text{O}}$, з якого випливає, що $v_{\text{H}_2\text{O}} = V p_{\text{H}_2\text{O}} / p$; $v_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,233 \cdot 10^4 / (1,0132 \cdot 10^5) = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м³. Обчислюємо суму парціальних об'ємів O₂ та N₂ за рівнянням $v_{\text{O}_2} + v_{\text{N}_2} = V - v_{\text{H}_2\text{O}}$; $v_{\text{O}_2} + v_{\text{N}_2} = 0,002 - 0,00024 = 1,76 \cdot 10^{-3}$ м³. Згідно умови $v_{\text{O}_2} / v_{\text{N}_2} = 0,21 / 0,79$. Звідси $v_{\text{O}_2} = 1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,21 = 0,37 \cdot 10^{-3}$ м³; $v_{\text{N}_2} = 1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,79 = 1,39 \cdot 10^{-3}$ м³. Обчислюємо парціальні тиски O₂ та N₂: $p_{\text{O}_2} = p v_{\text{H}_2\text{O}} / V$; $p_{\text{N}_2} = p - p_{\text{H}_2\text{O}} - p_{\text{O}_2}$; підставляючи числові значення величин, отримуємо: $p_{\text{O}_2} = 1,0132 \cdot 10^5 \cdot 3,7 \cdot 10^{-4} / (2 \cdot 10^{-3}) = 1,866 \cdot 10^4$ Па; $p_{\text{N}_2} = 1,0132 \cdot 10^5 - 0,1233 \cdot 10^5 - 0,1866 \cdot 10^5 = 7,033 \cdot 10^4$ Па.

Перевірка: $p = \Sigma p_i = (0,1866 + 0,7033 + 0,1233) 10^5 = 1,0132 \cdot 10^5$ Па.

Відповідь: $v_{\text{H}_2\text{O}} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м³; $v_{\text{N}_2} = 1,39 \cdot 10^{-3}$ м³; $p_{\text{O}_2} = 1,866 \cdot 10^4$ Па; $p_{\text{N}_2} = 7,033 \cdot 10^4$ Па.

Приклад 7.6. розрахувати відносну вологість повітря при $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо визначена конденсаційним гігрометром температура точки роси $t^p = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Розв'язання. Відносну вологість розраховуємо за формулою $\varphi = p_{\pi} / p_{\text{н}}(t)$. Температура $t^p = t_{\text{н}}(p_{\pi})$. Отже $p_{\pi} = p_{\text{н}}(t^p)$. За таблицею «Суха насичена пара і вода на лінії насичення (за температурами)» визначаємо: $p_{\text{н}}(40\text{ }^{\circ}\text{C}) = 7374\text{ Па}$; $p_{\pi} = p_{\text{н}}(20\text{ }^{\circ}\text{C}) = 2338\text{ Па}$; $\varphi = 2338 / 7374 = 0,318$.

Відповідь: $\varphi = 31,8\%$.

Приклад 7.7. Істинні (з урахуванням поправок) температури відпрацьованого повітря за сухим та «мокрим» термометрами психрометру, встановленого у вихідному повітропроводі сушильної камери, дорівнюють відповідно $t = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t^M = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Барометричний тиск $B = 745\text{ мм рт.ст.}$. Розрахувати основні термодинамічні параметри цього повітря.

Розв'язання. За таблицею «Суха насичена водяна пара і вода на лінії насичення (за температурами)» визначаємо тиск насичення $p_{\text{н}}(50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 118\text{ мм рт.ст.}$ і $p_{\pi} = p_{\text{н}}(40\text{ }^{\circ}\text{C}) = 55,32\text{ мм рт.ст.}$. Вологовміст насиченого при температурі t^M повітря $d = 622 p_{\pi}(40\text{ }^{\circ}\text{C}) / (B - p_{\pi}(40\text{ }^{\circ}\text{C}))$ (1). З рівнянь $(h_{\text{м}} - h) / (d_{\text{м}} - d) = 10^{-3} c_{\text{пп}} t^M$ і $h = c_{\text{сп}} t + 10^{-3} d(r_0 + c_{\text{п}} t)$ випливає, що вологовміст повітря, $d = 10^{-3} (h_{\text{м}} - c_{\text{сп}} t - 10^{-3} c_{\text{пп}} t^M d_{\text{м}}) / (r_0 + c_{\text{п}} t - c_{\text{пп}} t^M)$ (2), де ентальпія насиченого при t^M повітря $h_{\text{м}} = c_{\text{сп}} t^M + 10^{-3} d_{\text{м}}(r_0 + c_{\text{п}} t^M)$ (3). Знаючи t і d , легко обчислити інші параметри вологого повітря. Послідовність розв'язання наступна. Згідно (1), $d_{\text{м}} = 622 \cdot 55,32 / (745 - 55,32) \approx 49,89\text{ г/кг сп.}$ Згідно (3) $h_{\text{м}} = 1 \cdot 40 + 10^{-3} \cdot 49,89(2500 + 1,97 \cdot 40) \approx 168,6\text{ кДж/кг сп.}$ Згідно (2) $d = 10^{-3} (168,6 - 1 \cdot 55 - 10^{-3} \cdot 4,187 \cdot 40 \cdot 49,89) / (2500 + 1,97 \cdot 55 - 4,187 \cdot 40) \approx 43,15\text{ г/кг сп.}$ Ентальпія повітря $h = 1 \cdot 55 + 10^{-3} \cdot 43,15(2500 + 1,97 \cdot 55) \approx 167,5\text{ кДж/кг сп.}$ З співвідношення $d = 622 p_{\pi} / (B - p_{\pi})$ випливає, що парціальний тиск водяної пари у повітрі $p_{\pi} = 43,15 \cdot 745 / (622 \cdot 43,15) \approx 48,33\text{ мм рт.ст.}$ Цьому тиску відповідає температура насичення, яка дорівнює температурі точці роси $t^p = t_{\text{н}}(p_{\pi}) = 37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Відносна вологість $\varphi = p_{\pi} / p_{\text{н}}(t)$, де $p_{\text{н}}(50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 118\text{ мм рт.ст.}$ Тоді $\varphi = 48,33 / 118 \approx 0,41$. Потенціал сушіння $\varepsilon = t - t^M = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Відповідь: $d = 43,15\text{ г/кг сп.}$, $h = 167,15\text{ кДж/кг сп.}$, $p_{\pi} = 48,33\text{ мм рт.ст.}$, $\varphi = 41\%$, $t^p = 37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Приклад 7.8. Розрахувати густину вологого повітря при параметрах $t = 320\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{п}} = 0,3\text{ МПа}$, $d = 30\text{ г/кг сп.}$

Розв'язання. Вважаючи вологе повітря сумішню ідеальних газів (сухого повітря та водяної пари), його густину $\rho_{\text{вп}}$ можна розрахувати з рівняння Клапейрона: $\rho_{\text{вп}} = p / (R_{\text{вп}} T)$, де $R_{\text{вп}}$ - питома газова стала вологого повітря: $R_{\text{вп}} = g_{\text{сп}} R_{\text{сп}} + g_{\text{п}} R_{\text{п}}$. Масова частка сухого повітря у суміші $g_{\text{сп}} = 1 / (1 + d)$, а масова частка пари у суміші $g_{\text{п}} = d / (1 + d)$. Питома газова стала сухого повітря $R_{\text{сп}} = \mu R / \mu_{\text{сп}}$, а пари $R_{\text{п}} = \mu R / \mu_{\text{п}}$, де $\mu R = 8314\text{ Дж/(кмольК)}$; $\mu_{\text{сп}} = 28,97\text{ кг/кмоль}$; $\mu_{\text{п}} = 18\text{ кг/кмоль}$. Звідси випливає:

$$R_{\text{вп}} = \frac{1}{1+0,03} \cdot \frac{8314}{28,97} + \frac{0,03}{1+0,03} \cdot \frac{8314}{18} \approx 292\text{ Дж/(кгК)}; \rho_{\text{вп}} = \frac{3 \cdot 10^5}{292 \cdot 593,15} \approx 1,733\text{ кг/м}^3.$$

Відповідь: $\rho_{\text{вп}} = 1,733\text{ кг/м}^3$.

Приклад 7.9. Розрахувати зведену питому масову ізобарну теплоємність вологого повітря, яке має при нормальному атмосферному тиску $B = 0,10111\text{ МПа}$ температуру $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вологовміст 30 г/кг сп.

Розв'язання. Зведена теплоємність вологого повітря $\tilde{c} = c_{\text{сп}} + d c_{\text{п}}$, де $c_{\text{сп}} = \mu c_p(t_{\text{сп}}) / \mu_{\text{сп}}$ і $c_{\text{п}} = \mu c_p(t_{\text{п}}) / \mu_{\text{п}}$; молекулярні маси $\mu_{\text{сп}} = 28,97\text{ кг/моль}$ і $\mu_{\text{п}} = 18\text{ кг/моль}$ – сухого повітря і водяної пари відповідно. Згідно таблиці П1.4 додатків $\mu c_p(t_{\text{сп}}) = 28,7558 + 0,0057202t$, $\mu c_p(t_{\text{п}}) = 32,8367 + 0,0116611t$. Підставляючи числові значення, отримуємо: $c_{\text{сп}} = (28,7558 + 0,0057202 \cdot 50) / 28,97 = 1,002\text{ кДж/(кг сп К)}$; $c_{\text{п}} = (32,8367 + 0,0116611 \cdot 50) / 18 = 1,857\text{ кДж/(кгК)}$; $\tilde{c} = 1,002 + 0,03 \cdot 1,857 = 1,06\text{ кДж/(кг сп К)}$.

Відповідь: $\tilde{c} = 1,06\text{ кДж/(кг сп.К)}$.

Приклад 7.10. Обчислити зведену питому масову ізобарну теплоємність повітря при температурі $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо його відносна вологість $\phi = 30\%$ при $B = 0,10111\text{ МПа}$ (760 мм рт.ст.).

Розв'язання. Зведена теплоємність вологого повітря $\tilde{c} = c_{\text{сп}} + 10^{-3} d c_{\text{п}}$. Для сухого повітря $c_{\text{сп}} = \mu c_{p\text{пов}} / \mu_{\text{сп}}$, для водяної пари $c_{\text{п}} = \mu c_{p\text{п}} / \mu_{\text{п}}$, де згідно таблиці П1.3 додатків $\mu c_{p\text{пов}} = 28,7558 + 0,0057202t$ і пари $\mu c_{p\text{п}} = 32,8367 + 0,0116611t$. При температурі $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ тиск сухої насиченої водяної пари $p_{\text{н}}(50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 92,5\text{ мм рт.ст.}$ Вологовміст вологого повітря $d = 622 \phi p_{\text{н}}(50\text{ }^{\circ}\text{C}) / (B - \phi p_{\text{н}}(50\text{ }^{\circ}\text{C}))$. Підставляючи у формули числові значення величин, отри-

муєм: $d = 25,86 \text{ г/кг сп}$; $c_{\text{сп}} = 1,002 \text{ кДж/(кгК)}$; $c_{\text{п}} = 1,856 \text{ кДж/(кгК)}$; зведена теплоємність вологого повітря $\tilde{c} = 1,002 + 10^{-3} \cdot 25,86 \cdot 1,856 \approx 1,05 \text{ кДж/(кг сп К)}$.

Відповідь: $\tilde{c} = 1,05 \text{ кДж/(кг сп К)}$.

Приклад 7.11. Для спалювання 1 кг природного газу необхідно $l_{\text{п}} = 17 \text{ кг}$ сухого повітря. Яку кількість води буде внесено в топку з атмосферним повітрям, що подається на горіння з температурою 20°C і відносною вологістю 75% при $B = 0,1 \text{ МПа}$, якщо спалюється $V_{\text{пг}} = 500 \text{ м}^3/\text{год}$ газу з густиною $\rho = 0,78 \text{ кг/м}^3$?

Розв'язання. Для забезпечення подачі $L_{\text{сп}}$ сухого повітря на горіння природного газу необхідно подавати $L = L_{\text{сп}}(1 + d)$ зовнішнього повітря, з яким до топки потрапить $W = L_{\text{сп}}d$ води. Витрата сухого повітря $L_{\text{сп}} = l_{\text{сп}}G_{\text{г}}$, де $G_{\text{г}} = \rho V_{\text{пг}}$ – масова витрата природного газу. Вологовміст атмосферного повітря $d = 622\varphi p_{\text{н}}(t) / (B - \varphi p_{\text{н}}(t))$. Тиск насичення $p_{\text{н}}(20^\circ\text{C}) = 2336 \text{ Па}$, тоді $d = 622 \cdot 0,75 \cdot 2336,8 / (10^5 - 0,75 \cdot 2336,8) = 0,0111 \text{ кг/кг сп}$. Витрата сухого повітря $L_{\text{сп}} = l_{\text{сп}}\rho V_{\text{пг}}$; $L_{\text{сп}} = 17 \cdot 0,78 \cdot 500 = 6630 \text{ кг/год}$. Кількість внесеної води в топку $W = 6630 \cdot 0,0111 = 73,6 \text{ кг/год}$.

Відповідь: $W = 73,6 \text{ кг/год}$.

Приклад 7.12. Повітря, що надходить до сушильної камери, має температуру $t_1 = 85^\circ\text{C}$ і $\varphi_1 = 4\%$, а відпрацьоване – $t_2 = 40^\circ\text{C}$ і $\varphi_2 = 50\%$. Розрахувати густини повітря, віднесені до 1 м^3 сухого повітря, яке міститься у вологому, у цих двох станах, та проаналізувати, вплив якого параметру на густину превалює? $B = 0,981 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Розв'язання. Густина вологого повітря, віднесена до 1 м^3 сухого, що міститься в ньому, згідно [1.3]: $\rho = 1,293 \cdot 273(1 - 0,378p_{\text{п}}/B) / T_{\text{с}}$, де $T_{\text{с}} = t + 273 \text{ К}$, $p_{\text{п}} = \varphi p_{\text{н}}(t)$. Тиск насичення водяної пари (табл. П1.6 додатку): $p_{\text{н1}}(85^\circ\text{C}) = 0,578 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $p_{\text{н2}}(40^\circ\text{C}) = 0,0737 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Парціальні тиски: $p_{\text{п1}} = 0,04 \cdot 0,578 \cdot 10^5 = 0,023 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $p_{\text{п2}} = 0,5 \cdot 0,0737 \cdot 10^5 = 0,0368 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Густини: $\rho_1'' = 1,293 \cdot 273(1 - 0,378 \cdot 0,023 / 0,981) / (273 + 85) \approx 0,98 \text{ кг/м}^3\text{сп}$; $\rho_2'' = 1,293 \times 273(1 - 0,378 \cdot 0,0368 / 0,981) / (273 + 40) \approx 1,11 \text{ кг/м}^3\text{сп}$.

Відповідь: $\rho_1'' = 0,98 \text{ кг/м}^3\text{сп}$; $\rho_2'' = 1,11 \text{ кг/м}^3\text{сп}$. При збільшенні парціального тиску пари у повітрі густина зменшується, а при зменшенні температури повітря – зростає, причому вплив температури превалює.

Приклад 7.13. Повітря знаходиться під тиском $p = 0,1$ МПа при температурі $t = 150$ °С. Його відносна вологість $\varphi = 50\%$. Розрахувати вологовміст і температуру точки роси повітря.

Розв'язання. Оскільки $t = 150$ °С $> t_n(0,1\text{МПа})$, то вологовміст $d = 622\varphi / (1 - \varphi)$, а $\varphi = p_n / p$. Температура точки роси t^p – це температура насичення водяної пари у повітрі при парціальному тиску її $p_n = 0,5 \cdot 10^5$ Па. Цьому тиску відповідає температура насичення $t^p = 81,3$ °С (табл. П1.6 додатків). Вологовміст $d = 622 \cdot 0,5 / (1 - 0,5) = 622$ г/кг сп.

Відповідь: $d = 622$ г/кг сп; $t^p = 81,3$ °С.

Приклад 7.14. Дійсні (з урахуванням поправок) температури за сухим і «мокрим» термометрами психрометра, розміщеного у повітропроводі, в якому рухається вологе повітря під тиском $p = 0,15$ МПа, дорівнюють $t = 50$ °С і $t^m = 25$ °С. розрахувати вологовміст і відносну вологість повітря.

Розв'язання. Вологовміст насичення при температурі мокрого термометра $d_m = 622 p_n(t^m) / (p - p_n(t^m))$. Ентальпія насиченого повітря при d_m і t^m дорівнює $h_m = c_{сп} t^m + 10^{-3} d_m (r_0 + c_n t^m)$. Припускаючи, що рух повітря здійснюється у адіабатних умовах, $h_m = h = c_{сп} t + 10^{-3} d (r_0 + c_n t)$, отримуємо: вологовміст $d = (h - c_{сп} t) / [10^{-3} (r_0 + c_n t)]$. З співвідношення $d = 622 \varphi p_n(t) / (p - \varphi p_n(t))$ випливає, що $\varphi = dp / (p_n(t)(622 + d))$. З табл. П1.6 додатків визначаємо: $p_n(25$ °С) $= 3,1663 \cdot 10^{-3}$ МПа; $p_n(50$ °С) $= 12,335 \cdot 10^{-3}$ МПа. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $d_m = 622 \cdot 1 \cdot 3,1663 \cdot 10^{-3} / (0,15 - 1 \cdot 3,1663 \cdot 10^{-3}) = 13,4$ г/кг сп; $h_m = h = 1 \cdot 25 + 10^{-3} \cdot 13,4(2500 + 1,97 \cdot 25) \approx 59,16$ кДж/кг сп; $d = (59,16 - 1 \cdot 50) / (10^{-3} (2500 + 1,97 \cdot 50)) \approx 3,53$ г/кг сп $\varphi = 3,53 \cdot 0,15 \cdot 100 / (12,335 \cdot 10^{-3} \times 635,4) = 6,75$ %.

Відповідь: $d = 3,53$ г/кг сп; $\varphi = 6,75$ %.

Приклад 7.15. До калориферу надходить зовнішнє повітря з температурою 12 °С і відотною вологістю 83 % та нагрівається у ньому до температури 46 °С. Подача зовнішнього повітря така, що забезпечує витрату через калорифер абсолютно сухого повітря у кількості $L_{сп} = 3600$ кг/год. Розрахувати відносну вологість повітря після нагрівання і теплову потужність калорифера. Барометричний тиск $B = 99310$ Па.

Розв'язання. Теплова потужність калорифера $Q = L_{сп} (h_2 - h_1)$, де h_2 , h_1 – питомі ентальпії повітря після та до калорифера. Значення ентальпій h_2 і h_1

визначаємо за формулою $h = c_{\text{сп}}t + 10^{-3}d(r_0 + c_{\text{п}}t)$, враховуючи, що при нагріванні в поверхневому калорифері $d_1 = d_2$. Вологовміст $d_1 = 622 \cdot \phi_1 p_{\text{н}}(t_1) / (B - \phi_1 p_{\text{н}}(t_1))$. Відносна вологість повітря після нагрівання в калорифері $\phi_2 = d_2 B / [(622 + d_2) p_{\text{н}}(t_2)]$. За таблицею П1.6 додатку визначаємо: $p_{\text{н}}(12^\circ\text{C}) = 1401,5$ Па; $p_{\text{н}}(46^\circ\text{C}) = 10132,6$ Па. Підставляючи числові значення величин до формул, отримуємо: $d_1 = d_2 = 7,46$ г/кг сп; $h_1 = 31$ кДж/кг сп; $h_2 = 65,3$ кДж/кг сп; $\phi_2 \approx 12\%$; $Q = 1(65,3 - 31) = 34,3$ кВт.

Відповідь: $\phi_2 \approx 12\%$; $Q = 34,3$ кВт.

Приклад 7.16. Вологе повітря з температурою $t_1 = 175^\circ\text{C}$ і вологовмістом $d_1 = 150$ г/кг сп охолоджується у поверхневому охолоджувачі до $t_2 = 40^\circ\text{C}$. Витрата повітря $L_1 = 100$ кг/год на вході в охолоджувач. Барометричний тиск $B = 99325$ Па. Розрахувати кількість води, що створюється при охолодженні, витрату повітря на виході з охолоджувача і теплову потужність охолоджувача.

Розв'язання. Теплова потужність охолоджувача $Q = L_{\text{сп}}(h_1 - h_2)$, де $L_{\text{сп}} = L_1 / (1 + 10^{-3}d_1)$ – витрата абсолютно сухого повітря через охолоджувач. Питомі ентальпії повітря $h_1 = c_{\text{сп}}t_1 + 10^{-3}d_1(r_0 + c_{\text{п}}t_1)$ і $h_2 = c_{\text{сп}}t_2 + 10^{-3}d_2(r_0 + c_{\text{п}}t_2)$. Охолодження повітря при сталому вологовмісті d_1 відбувається до стану повного насичення повітря – до досягнення повітрям температури точки роси $t_1^{\text{р}}$, яка дорівнює температурі насичення водяної пари у повітрі при її парціальному тиску $p_{\text{п},1}$, який відповідає вологовмісту d_1 . Тиск $p_{\text{п},1} = p_{\text{н}}(t_1^{\text{р}}) = d_1 B / (622 + d_1)$. Подальше охолодження повітря до температури t_2 супроводжується конденсацією з повітря водяної пари і осушкою повітря. При цьому повітря залишається насиченим ($\phi = 1$), а його вологовміст зменшується до d_2 , яке досягається при температурі t_2 насиченого повітря. Вологовміст $d_2 = 622 p_{\text{н}}(t_2) / (B - p_{\text{н}}(t_2))$. Питома витрата абсолютно сухого повітря $l_{\text{сп}} = 10^3 / (d_1 - d_2)$, а кількість пари, що сконденсувалася, $W = L_{\text{сп}} / l = 10^{-3} L_{\text{сп}} (d_1 - d_2)$. Витрата повітря на виході з охолоджувача $L_2 = L_1 - W$. Послідовність розв'язання наступна: $p_{\text{н}}(t_2) = p_{\text{н}}(40^\circ\text{C}) = 7375$ Па; $d_2 = 622 \cdot 7375 / (99325 - 7375) = 49,9$ г/кг сп.; $h_1 = 1 \cdot 175 + 10^{-3} 150 (2500 + 1,97 \cdot 175) = 601,7$ кДж/кг сп; $h_2 = 1 \cdot 40 + 10^{-3} 49,9 (2500 + 1,97 \cdot 40) = 168,7$ кДж/кг сп; $L_{\text{сп}} =$

$$= 100 \cdot 1 / (3600(1 + 10^{-3} \cdot 150)) = 0,024 \text{ кг сп/с}; W = 10^{-3} \cdot 0,024(150 - 49,9) \approx 0,0024 \text{ кг/с};$$

$$L_2 = 0,028 - 0,0024 = 0,0256 \text{ кг/с} = 92,16 \text{ кг/год}; Q = 0,024(601,7 - 168,7) \approx 10,4 \text{ кВт}.$$

Для знаходження температури точки роси обчислюємо $p_n(t_1^p) = 150 \cdot 99325 / (622 + 150) = 19299 \text{ Па}; t_1^p = 59,3 \text{ }^\circ\text{C}.$

Відповідь: $W = 0,0024 \text{ кг/с}; L_2 = 0,0256 \text{ кг/с}; Q = 10,4 \text{ кВт}.$

Приклад 7.17. Вологе повітря з температурою $t_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ і відносною вологістю $\phi_1 = 20 \text{ \%}$ охолоджується до $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, а потім повторно нагрівається до $t_3 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Барометричний тиск $B = 99325 \text{ Па}$. розрахувати температуру точки роси повітря у вихідному стані та як зміниться відносна вологість повітря після його охолодження і повторного нагрівання. Охолоджувач і нагрівач рекуперативного типу.

Розв'язання. В апаратах рекуперативного типу нагрів вологого повітря і охолодження його до точки роси відбуваються при сталому вологовмісті повітря, яке надходить в апарат. Температура t_1^p – це температура повітря, при якій водяна пара у повітрі стає насиченою при своєму парціальному тиску $p_{n,1} = d_1 B / (622 + d_1)$. Вологовміст повітря $d_1 = 622 \phi_1 p_n(t_1) / (B - \phi_1 p_n(t_1))$. Якщо $t_1^p > t_2$, то охолодження повітря від t_1^p до t_2 супроводжується конденсацією пари, що міститься в ньому, і осушкою повітря. При цьому повітря залишається насиченим, а його вологовміст зменшується від d_1 до $d_2 = 622 p_n(t_2) / (B - p_n(t_2))$, яке досягається при температурі t_2 насиченого повітря. Відносна вологість ϕ_3 повітря після його повторного нагрівання при $d_2 = \text{const}$ до температури t_3 буде: $\phi_3 = p_n(t_2) / p_n(t_3)$. Послідовність розв'язування наступна: $p_n(t_1) = p_n(t_3) = p_n(90 \text{ }^\circ\text{C}) = 70108 \text{ Па}; p_n(t_2) = p_n(20 \text{ }^\circ\text{C}) = 2337 \text{ Па}; d_1 = 622 \cdot 0,2 \cdot 70108 / (99325 - 0,2 \cdot 70108) = 102,2 \text{ г/кг сп}; p_{n,1} = 102,2 \times 99325 / (622 + 102,2) = 14017 \text{ Па}; t_1^p = 52,6 \text{ }^\circ\text{C}; \phi_3 = 2337 / 70108 \approx 0,033.$

Відповідь: $t_1^p = 52,6 \text{ }^\circ\text{C}; \phi_3 = 3,3 \text{ \%}.$

Приклад 7.18. У трубчастому протитоковому теплообміннику без теплових втрат, площа поверхні теплообміну якого дорівнює $F = 15 \text{ м}^2$, охолоджується повітря до температури точки роси. Параметри повітря, що надходить у теплообмінник, $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\phi_1 = 20 \text{ \%}$. Охолоджуюча вода нагрівається від температури $t_2' = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2'' = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнт тепло- передачі в теплообміннику $k = 46 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$. Розрахувати витрати повітря, що надхо-

дить на охолодження, та охолоджуючої води. Барометричний тиск $B = 99325$ Па.

Розв'язання. Витрата абсолютно сухого повітря, що міститься у вологому повітрі, яке надходить на охолодження $L_{ac} = Q / (h_1 - h_2)$, а витрата вологого повітря, що надходить $L_{вп} = L_{ac} (1 + 10^{-3} d_1)$. Ентальпія повітря $h_1 = c_{сп} t_1 + 10^{-3} d_1 (r_0 + c_{п} t_1)$. Вологовміст $d_1 = 622 \phi_1 \delta_i(t_1) / (B - \phi_1 \delta_i(t_1))$. Враховуючи, що при охолодженні у даному теплообміннику $d_1 = \text{const}$, ентальпія охолодженого повітря $h_2 = c_{сп} t^p + 10^{-3} d_1 (r_0 + c_{п} t^p)$, де t^p – температура точки роси, яка визначається як температура насичення водяної пари, що міститься у повітрі, при її парціальному тиску $\delta_i = d_1 B / (622 + d_1)$. Витрата охолоджуючої води $G_b = Q / [c_p (t_2'' - t_2')]$. Теплове навантаження Q згідно рівнянню теплопередачі, $Q = k \Delta \bar{t} F$, де $\Delta \bar{t} = (\Delta t_6 - \Delta t_m) / \ln(\Delta t_6 / \Delta t_m)$. Температурні різниці $\Delta t_6 = t_1 - t_2''$ і $\Delta t_m = t^p - t_2'$. Послідовність розв'язування наступна: $p_h(t_1) = p_h(60^\circ \text{C}) = 19919$ Па; $d_1 = 622 \frac{0,2 \cdot 19919}{99325 - 0,2 \cdot 19919} = 26$ г/кг сп;

$p_h = 26 \cdot 99325 / (622 + 26) = 3985$ Па; $t^p = 28,9^\circ \text{C}$; $h_1 = 1 \cdot 60 + 26 \times 10^{-3} (2500 + 1,97 \cdot 60) = 128$ кДж/кг сп; $h_2 = 1 \cdot 28,9 + 26 \cdot 10^{-3} (2500 + 1,97 \cdot 28,9) = 95,4$ кДж/кг сп; $\Delta t_6 = 60 - 25 = 35^\circ \text{C}$; $\Delta t_m = 28,9 - 15 = 13,9^\circ \text{C}$; $\Delta \bar{t} = (35 - 13,9) / \ln(35 / 13,9) = 22,9^\circ \text{C}$; $L_{ac} = 46 \cdot 22,9 \cdot 15 \cdot 10^{-3} / (128 - 95,4) \approx 0,485$ кг/с; $L_{вп} = 0,485 (1 + 10^{-3} \cdot 26) \approx 0,497$ кг/с; $G_b = 46 \cdot 22,9 \cdot 15 \cdot 10^{-3} / (4,187 (25 - 15)) \approx 0,377$ кг/с.

Відповідь: $L_{вп} = 0,497$ кг/с; $G_b = 0,377$ кг/с.

Приклад 7.19. Розрахувати параметри суміші вологого повітря, створеної при змішуванні 30% холодного повітря з параметрами $t_1 = 10^\circ \text{C}$ і $\phi_1 = 45\%$ та 70% гарячого з параметрами $t_2 = 80^\circ \text{C}$ і $\phi_2 = 80\%$. Процес змішування ізобарно-адіабатичний при $B = 745$ мм рт. ст.

Розв'язання. Параметри суміші розраховують за формулами: $d_{см} = (d_1 + n d_2) / (1 + n)$ і $h_{см} = (h_1 + n h_2) / (1 + n)$, де n – коефіцієнт рециркуляції. За визначенням n обчислюється через відношення абсолютно сухих частин компонентів суміші:

$$n = \frac{L_{2ac}}{L_{1ac}} = \frac{L_{2вп}}{1 + 10^{-3} d_2} : \frac{L_{1вп}}{1 + 10^{-3} d_1} = \frac{0,7 L_{смвп}}{0,3 L_{смвп}} \cdot \frac{1 + 10^{-3} d_1}{1 + 10^{-3} d_2} = 2,33 \frac{1 + 10^{-3} d_1}{1 + 10^{-3} d_2},$$
 де $d_1 = 622 \phi_1 p_h(t_1) / (B - \phi_1 p_h(t_1))$ і $d_2 = 622 \phi_2 p_h(t_2) / (B - \phi_2 p_h(t_2))$. Питомі

ентальпії компонентів суміші: $h_1 = c_{\text{сп}} t_1 + 10^{-3} d_1 (r_0 + c_{\text{п}} t_1)$; $h_2 = c_{\text{сп}} t_2 + 10^{-3} d_2 (r_0 + c_{\text{п}} t_2)$.

Визначення істинних значень параметрів суміші ускладнено тим, що в залежності від початкового стану компонентів суміші лінія процесу змішування може розташовуватися на h, d -діаграмі частково нижче лінії $\phi = 100\%$. Тому при аналітичних розрахунках необхідно перевіряти, чи не лежить точка з параметрами $d_{\text{см}}$ і $h_{\text{см}}$ на ділянці лінії змішування, яка розташована нижче лінії $\phi = 100\%$. Для цього необхідно порівняти значення ентальпій $h_{\text{см}}$ і h^p , які відповідають температурі точки роси суміші при вологовмісті $d_{\text{см}}$. У випадку $h_{\text{см}} < h^p = c_{\text{сп}} t^p + 10^{-3} d_{\text{см}} (r_0 + c_{\text{п}} t^p)$, де t^p – температура точки роси при $d_{\text{см}}$ і B , ділянка лінії змішування буде розташована нижче ізогідри $\phi = 100\%$. Це означає, що з повітря в результаті змішування буде випадати волога. Оскільки температура цієї води є близькою до температури t^m мокрого термометру, то для визначення параметрів $d'_{\text{см}}$ і $h'_{\text{см}}$, які відповідають дійсному стану суміші, можна вчинити так.

Приймаємо, що $h_{\text{см}} \approx h'_{\text{см}} = c_{\text{сп}} t'_{\text{см}} + 10^{-3} d'_{\text{см}} (r_0 + c_{\text{п}} t'_{\text{см}})$. Підставляючи у цю формулу $d'_{\text{см}} = 622 p_{\text{н}}(t'_{\text{см}}) / (B - p_{\text{н}}(t'_{\text{см}}))$, отримуємо рівняння з одним невідомим $t'_{\text{см}}$, розв'язуючи яке визначаємо $t'_{\text{см}}$ і відповідний цій температурі тиск насичення $p_{\text{н}}(t'_{\text{см}})$. розраховуємо $d'_{\text{см}}$ і $h'_{\text{см}}$. Послідовність розв'язання наступна. За таблицею П1.6 додатку визначаємо $p_{\text{н}}(10^\circ\text{C}) = 9,21$ мм рт. ст. і $p_{\text{н}}(80^\circ\text{C}) = 355,1$ мм рт. ст. розраховуємо:

$$d_1 = 622 \frac{0,45 \cdot 9,21}{745 - 0,45 \cdot 9,21} \approx 3,5 \text{ г/кг сп.} \quad \text{і} \quad d_2 = 622 \frac{0,8 \cdot 355,1}{745 - 0,8 \cdot 355,1} \approx 383 \text{ г/кг сп.}; \quad h_1 =$$

$$= 1 \cdot 10 + 10^{-3} 3,5 \cdot (2500 + 1,97 \cdot 10) = 18,82 \text{ кДж/кг сп.} \quad \text{і} \quad h_2 = 1 \cdot 80 + 10^{-3} \cdot 383 \times$$

$$\times (2500 + 1,97 \cdot 80) = 1099 \text{ кДж/кг сп.}; \quad n = 0,7(1 + 10^{-3} \cdot 3,5) / 0,3(1 + 10^{-3} \cdot 383) =$$

$$= 1,69. \text{ Параметри суміші: } h_{\text{см}} = (1 \cdot 18,82 + 1,69 \cdot 1099) / (1 + 1,69) \approx 697 \text{ г/кг}; \quad d_{\text{см}} =$$

$$= \frac{1 \cdot 3,5 + 1,69 \cdot 383}{1 + 1,69} = 242,2 \frac{\text{г}}{\text{кг}}. \text{ Визначаємо температуру точки роси } t^p, \text{ яка відпо-}$$

відає $d_{\text{см}}$ при $B = 745$ мм рт.ст. З співвідношення $d_{\text{см}} = 622 p_{\text{н}}(t^p) / (B - p_{\text{н}}(t^p))$ визначаємо $p_{\text{н}}(t^p) = 209,6$ мм рт.ст., якому згідно таблиці П1.6 додатку відповідає температура $t^p = 67,4^\circ\text{C}$. Питома ентальпія $h^p = 1 \cdot 67,4 + 10^{-3} \cdot 242(2500 + 1,97 \cdot 67,4) \approx 705$ кДж/кг сп, тобто, $h^p > h_{\text{см}}$. Це означає, що лінія процесу змішування проходить нижче лінії $\phi = 100\%$.

Розраховуємо температуру $t'_{\text{см}}$. Розв'язуючи рівняння $697 = 1 \cdot t'_{\text{см}} + 0,622 \frac{p_{\text{н}}(t'_{\text{см}})}{745 - p_{\text{н}}(t'_{\text{см}})} (2500 + 1,97 t'_{\text{см}})$ відносно $t'_{\text{см}}$, отримуємо $t'_{\text{см}} \approx 67,2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Цій температурі згідно таблиці П1.6 додатку відповідає тиск $p_{\text{н}}(67,2 \text{ } ^\circ\text{C}) = 207,7 \text{ мм рт.ст.}$ Тоді $d'_{\text{см}} = 622 \cdot 207,7 / (745 - 207,7) \approx 240,4 \text{ г/кг сп.}$

Відповідь: $d'_{\text{см}} = 240,4 \text{ г/кг сп.}$; $h'_{\text{см}} \approx 697 \text{ кДж/кг сп.}$; $\varphi_{\text{см}} = 100 \text{ \%}$.

Приклад 7.20. Розрахувати вологовміст, температуру, ентальпію суміші після ізобарно-адіабатного змішування зовнішнього повітря з параметрами $t_0 = -10 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 80 \text{ \%}$ і відпрацьованого сушильного агента з параметрами $t_2 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 50 \text{ \%}$. Витрата зовнішнього повітря $G_0 = 10 \text{ кг/с}$, витрата сушильного агента $G_2 = 15 \text{ кг/с}$, $B = 760 \text{ мм рт.ст.}$

Розв'язання. При ізобарно-адіабатному змішуванні вологовміст суміші $d_{\text{см}} = (d_0 + n d_2) / (1 + n)$, ентальпія суміші $h_{\text{см}} = (h_0 + n h_2) / (1 + n)$, де коефіцієнт рециркуляції $n = G_{2\text{с}} / G_{0\text{с}}$. Витрата абсолютно сухої частини компонентів суміші $G_{0\text{с}} = G_0 / (1 + d_0)$, $G_{2\text{с}} = G_2 / (1 + d_0)$. Вологовмісти: $d_0 = 0,622 \varphi_0 p_{\text{н}}(t_0) / (B - \varphi_0 p_{\text{н}}(t_0))$ і $d_2 = 0,622 \varphi_2 p_{\text{н}}(t_2) / (B - \varphi_2 p_{\text{н}}(t_2))$.

При виникненні сумнівів стосовно розташування точки з параметрами $d_{\text{см}}$ і $h_{\text{см}}$ вище ізогідри $\varphi = 100 \text{ \%}$ необхідно здійснити перевірку, порівнявши значення ентальпій $h_{\text{см}}$ і $h^{\text{п}}$, які відповідають температурі $t^{\text{п}}$ точки роси при вологовмісті $d_{\text{см}}$. Виконаємо таку перевірку.

За таблицею П1.6 додатку визначаємо тиски насичення $p_{\text{н}}(-10 \text{ } ^\circ\text{C}) = 1,946 \text{ мм рт.ст.}$ і $p_{\text{н}}(40 \text{ } ^\circ\text{C}) = 55,32 \text{ мм рт.ст.}$ Розраховуємо: $d_0 = 0,622 \cdot 0,8 \cdot 1,946 / (760 - 0,8 \cdot 1,946) = 1,276 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг сп.}$; та $d_2 = 0,622 \cdot 0,5 \cdot 55,32 / (760 - 0,5 \cdot 55,32) = 23,49 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг сп.}$; $h_0 = 1(-10) + 1,276 \cdot 10^{-3} (2500 + 1,97 \cdot (-10)) = -6,84 \text{ кДж/кг}$; $h_2 = 1 \cdot 40 + 23,49 \cdot 10^{-3} (2500 + 1,97 \cdot 40) = 100,6 \text{ кДж/кг}$; $G_{0\text{с}} = 10 / (1 + 1,276 \cdot 10^{-3}) = 9,987 \text{ кг/с}$; $G_{2\text{с}} = 15 / (1 + 23,49 \cdot 10^{-3}) = 14,656 \text{ кг/с}$; $n = 14,656 / 9,987 = 1,468$; $d_{\text{см}} = (1 \cdot 1,276 + 1,468 \cdot 23,49) / (1 + 1,468) = 14,49 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}$; $h_{\text{см}} = (1(-6,84) + 1,468 \cdot 100,6) / (1 + 1,468) = 57,1 \text{ кДж/кг сп.}$

З співвідношення $d_{\text{см}} = 622 P_{\text{н}}(t^{\text{п}}) / (B - P_{\text{н}}(t^{\text{п}}))$ визначаємо $p_{\text{н}}(t^{\text{п}}) = 14,49 \cdot 760 / (622 + 14,49) = 17,3 \text{ мм рт.ст.}$, якому згідно таблиці П 1.6 відповідає $t^{\text{п}} = 19,77 \text{ } ^\circ\text{C}$. Ентальпія $h^{\text{п}} = 1 \cdot 19,77 + 10^{-3} \cdot 14,49 (2500 + 1,97 \cdot 19,77) = 56,56 \text{ кДж/кг сп.}$ Очевидно, що $h_{\text{см}} > h^{\text{п}}$. Це дозволяє розрахувати $t_{\text{см}}$ за співвідношенням $t_{\text{см}} = (h_{\text{см}} - 10^{-3} d_{\text{см}} r_0) / (c_{\text{сп}} + 10^{-3} d_{\text{см}} c_{\text{п}})$. Підставляючи числові значення величин,

отримуємо: $t_{\text{см}} = (57,1 - 10^{-3} \cdot 14,49 \cdot 2500) / (1 + 10^{-3} \cdot 14,49 \cdot 1,97) = 20,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто $t_{\text{см}} > t^{\text{p}}$. Точка з параметрами $d_{\text{см}}$ і $h_{\text{см}}$ лежить вище ізогідри $\phi = 1$.

Відповідь : $d_{\text{см}} = 14,49 \text{ г/кг сп}$; $h_{\text{см}} = 57,1 \text{ кДж/кг сп}$; $t_{\text{см}} = 20,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Приклад 7.21. Вологе повітря з параметрами $t_1 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і $d_1 = 1,5 \text{ г/кг сп}$, яке містить у собі 5 кг сухого повітря, змішується з вологим повітрям з параметрами $t_2 = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і $d_2 = 21,5 \text{ г/кг сп}$, яке містить у собі 15 кг сухого повітря, а потім суміш надходить у поверхневий калорифер, де нагрівається до температури $t_3 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначити параметри стану суміші повітря після калорифера та кількість теплоти, витрачену на нагрівання суміші в калорифері. Прийняти $B = 745 \text{ мм рт.ст.}$

Розв'язання. У поверхневому калорифері повітря нагрівається при $d = \text{const}$. Оскільки процес ізобарний, то кількість теплоти, підведена до повітря у калорифері, $Q = m_{\text{см}} \Delta h = (m_1 + m_2)(h_3 - h_{\text{см}})$. Після нагрівання повітря має параметри: $d_3 = d_{\text{см}}$; $h_3 = c_{\text{сп}} t_3 + 10^{-3} d_3 (r_0 + c_{\text{п}} t_3)$. На вході в калорифер вологовміст і ентальпія повітря можуть бути визначені за співвідношеннями: $d_{\text{см}} = (d_1 + n d_2) / (1 + n)$ і $h_{\text{см}} = (h_1 + n h_2) / (1 + n)$, де коефіцієнт рециркуляції $n = m_2 / m_1$. Послідовність розв'язання наступна. Визначаємо значення $n = 15 / 5 = 3$; за співвідношенням $h = c_{\text{сп}} t + 10^{-3} d (r_0 + c_{\text{п}} t)$ обчислюємо значення $h_1 = 1 \cdot 10 + 10^{-3} \cdot 1,5(2500 + 1,97 \cdot 10) \approx 13,8 \text{ кДж/кг сп}$ і $h_2 = 1 \cdot 30 + 10^{-3} \cdot 21,5(2500 + 1,97 \cdot 30) \approx 85 \text{ кДж/кг сп}$. Обчислюємо значення $d_{\text{см}} = (1,5 + 3 \cdot 21,5) / (1 + 3) = 16,5 \text{ г/кг сп}$ і $h_{\text{см}} = (13,8 + 3 \cdot 85) / (1 + 3) \approx 67,2 \text{ кДж/кг сп}$. Обчислюємо значення ентальпії $h_3 = 1 \cdot 60 + 10^{-3} \cdot 16,5(2500 + 1,97 \cdot 60) \approx 103 \text{ кДж/кг сп}$, а також кількість теплоти, підведену до повітря у калорифері, $Q = (5 + 15)(103 - 67,2) = 716 \text{ кДж}$.

Параметри ϕ_3 і t_3^{p} розраховують так: парціальний тиск $p_{\text{пз}} = B d_3 / (622 + d_3)$; $p_{\text{пз}} = 0,0993 \cdot 16,5 / (622 + 16,5) \approx 0,00257 \text{ МПа}$; відповідна цьому тиску температура насичення водяної пари, дорівнює температурі точки роси $t_3^{\text{p}} = 21,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$; тиск насичення при $t_3 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює $p_{\text{н}}(t_3) = 0,01992 \text{ МПа}$; відносна вологість $\phi_3 = p_{\text{пз}} / p_{\text{н}}(t_3)$; $\phi_3 = (0,00257 / 0,01992) \cdot 100 \approx 12,9 \text{ \%}$.

Відповідь: $d_3 = 16,5 \text{ г/кг сп}$; $h_3 = 103 \text{ кДж/кг сп}$; $\phi_3 = 12,9 \text{ \%}$; $t_3^{\text{p}} = 21,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 716 \text{ кДж}$.

Приклад 7.22. Стан повітря задано параметрами $t_0 = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\phi_0 = 5\%$. Визначити за допомогою h, d -діаграми інші параметри повітря в цьому стані. $B = 745 \text{ мм рт.ст.}$

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.1. За значеннями t_0 і φ_0 наносять на діаграму точку А. Далі діють згідно вказівок на рисунку.

Відповідь: $t_A^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$; $t_A^m = 29,8\text{ }^\circ\text{C}$; $d_A = 10\text{ г/кг сп}$; $h_A = 96,8\text{ кДж/кг сп}$;
 $p_{\text{п}} = 6\text{ кПа}$; $\varepsilon_A = 40,2\text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад 7.23. Виміряні термометрами психрометра температури повітря $t_0 = 70\text{ }^\circ\text{C}$ і $t_0^m = 30\text{ }^\circ\text{C}$. Визначити за допомогою h,d -діаграми інші параметри повітря в цьому стані. $B = 745\text{ мм рт.ст.}$

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.2. По значеннях t_0 і t_0^m наносять на діаграму точку А. Далі діють згідно вказівок на рисунку.

Відповідь: $\varphi_A = 5\text{ \%}$; $d_A = 10\text{ г/кг сп}$; $p_{\text{п}} = 6\text{ кПа}$; $\varepsilon_A = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $t_A^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$;
 $h_A = 96,8\text{ кДж/кг сп}$.

Приклад 7.24. Виміряні термометрами конденсаційного гігрометра температура повітря $t_0 = 70\text{ }^\circ\text{C}$ і температура конденсації водяної пари з повітря $t_0^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$. Визначити за допомогою h,d -діаграми інші параметри повітря в цьому стані. $B = 745\text{ мм рт.ст.}$

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.3. За значеннями t_0 і t_0^p наносять на діаграму точку А. Далі діють згідно вказівок на рисунку.

Відповідь: $\varphi_A = 5\text{ \%}$; $d_A = 10\text{ г/кг сп}$; $p_{\text{п}} = 6\text{ кПа}$; $h_A = 96,8\text{ кДж/кг сп}$;
 $\varepsilon_A = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $t_A^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$; $t_A^m = 30\text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад 7.25. Стан вологого повітря характеризують параметри $t_0 = 70\text{ }^\circ\text{C}$ і $d_0 = 10\text{ г/кг сп}$. Визначити за допомогою h,d -діаграми інші параметри повітря в цьому стані. $B = 745\text{ мм рт.ст.}$

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.4. За значеннями t_0 і d_0 наносять на діаграму точку А. Далі діють згідно вказівок на рисунку.

Відповідь: $\varphi_A = 5\text{ \%}$; $t_A^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$; $t_A^m = 30\text{ }^\circ\text{C}$; $p_{\text{п}} = 6\text{ кПа}$; $h_A = 96,8\text{ кДж/кг сп}$;
 $\varepsilon_A = 40\text{ }^\circ\text{C}$.

Приклад 7.26. Стан вологого повітря характеризують такі параметри: температури точки роси $t_0^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$ і мокрого термометру $t_0^m = 30\text{ }^\circ\text{C}$, барометричний тиск $B = 745\text{ мм рт.ст.}$. Визначити за допомогою h, d -діаграми інші параметри повітря в цьому стані.

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.5. За значеннями t_0^p , t_0^m наносять на діаграму точку А. Далі діють згідно вказівок на рисунку.

Відповідь: $\varphi_A = 5\text{ \%}$; $t_A = 70\text{ }^\circ\text{C}$; $d_A = 10\text{ г/кг сп}$; $p_{\text{п}} = 6\text{ кПа}$; $\varepsilon_A = 40\text{ }^\circ\text{C}$;
 $h_A = 96,8\text{ кДж/кг сп.}$

Приклад 7.27. Виміряна конденсаційним гігрометром температура точки роси повітря $t_0^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$ при тиску $B = 745\text{ мм рт.ст.}$ Ентальпія цього повітря $h_0 = 96,8\text{ кДж/кг сп.}$ Визначити за допомогою h, d -діаграми інші параметри повітря в цьому стані.

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.6 За значеннями $t_0^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$ і h_0 наносять на діаграму точку А. Далі діють згідно вказівок на рисунку.

Відповідь: $t_A = 70\text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_A = 5\text{ \%}$; $d_A = 10\text{ г/кг сп}$; $t_A^m = 30\text{ }^\circ\text{C}$; $\varepsilon_A = 40\text{ }^\circ\text{C}$;
 $p_{\text{п}} = 6\text{ кПа.}$

Приклад 7.28. Визначені за допомогою психрометра температура мокрого термометру $t_0^m = 30\text{ }^\circ\text{C}$ і відносна вологість повітря $\varphi_0 = 5\text{ \%}$ при барометричному тиску $B = 745\text{ мм рт.ст.}$ Визначити за допомогою h, d -діаграми інші параметри повітря в цьому стані.

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.7. За значеннями t_0^m і φ_0 наносять на діаграму точку А. Далі діють згідно вказівок на рисунку.

Відповідь: $t_A = 70\text{ }^\circ\text{C}$; $d_A = 10\text{ г/кг сп}$; $h_A = 96,8\text{ кДж/кг сп}$; $t_A^p = 14\text{ }^\circ\text{C}$;
 $\varepsilon_A = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $p_{\text{п}} = 6\text{ кПа.}$

Приклад 7.29. Стан вологого повітря визначений вологовмістом $d_0 = 10\text{ г/кг сп}$ і температурою мокрого термометра $t_0^m = 30\text{ }^\circ\text{C}$ при барометрич-

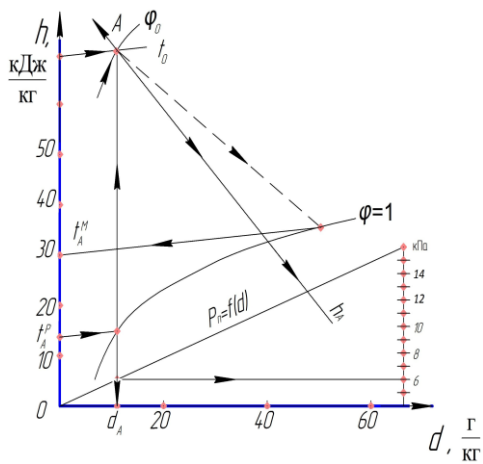


Рис.7.3. До прикладу 7.24.

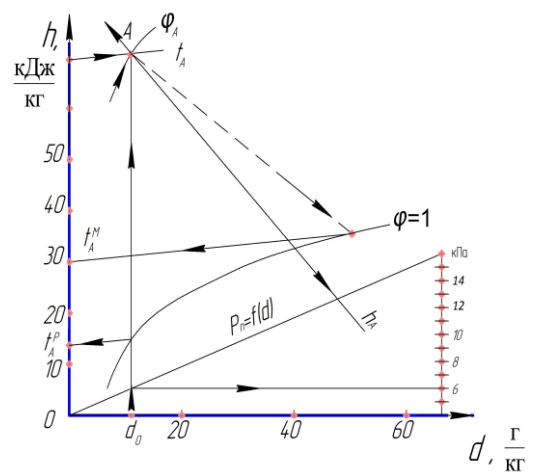


Рис.7.4. До прикладу 7.25.

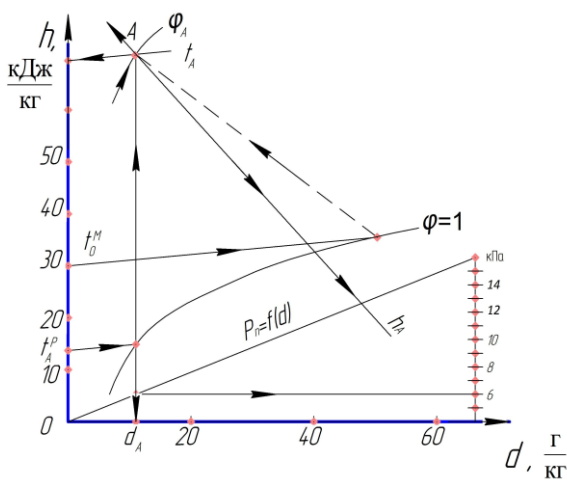


Рис.7.5. До прикладу 7.26.

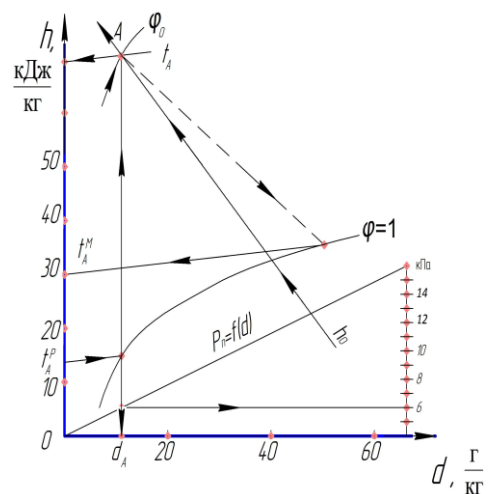


Рис.7.6. До прикладу 7.27.

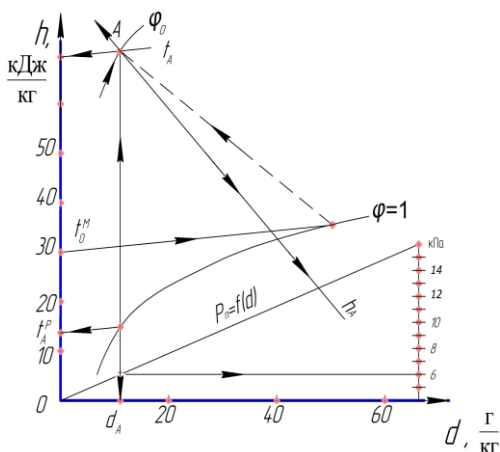


Рис.7.7. До прикладу 7.28.

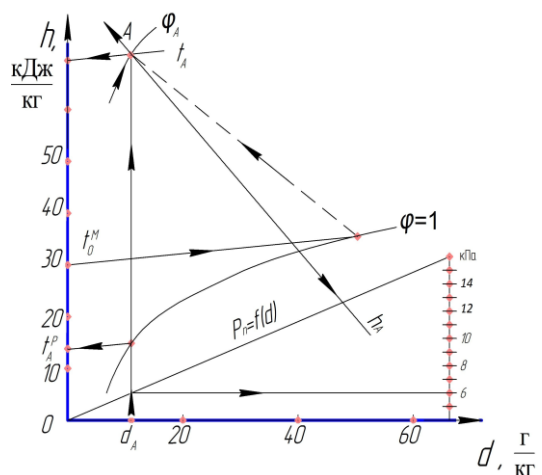


Рис.7.8. До прикладу 7.29.

Приклад 7.31. Вологе повітря має температуру $t = 200^\circ\text{C}$ і вологовміст $d = 50 \text{ г/кг}$ сп при тиску $B = 745 \text{ мм рт. ст.}$ Визначити за допомогою h, d -діаграми відносну вологість цього повітря і порівняти отримане значення зі

значенням, розрахованим аналітично. Як зміниться результат порівняння, якщо при $B = 765$ мм рт.ст. температура повітря буде $50\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Розв'язання. Значення φ , визначене по діаграмі, при $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $d = 50$ г/кг сп дорівнює $\varphi_d \approx 7,38\%$, а при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $d = 50$ г/кг сп – $\varphi_d = 60\%$. Оскільки $200\text{ }^{\circ}\text{C} > t_H(765\text{ мм рт.ст.}) = 100,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, то $\varphi = p_n / B$, де парціальний тиск водяної пари у повітрі $p_n = dB / (622 + d)$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо: $p_n = 50 \cdot 765 / (622 + 50) = 56,92$ мм рт.ст.; $\varphi = 56,92 \cdot 100 / 765 \approx 7,44\%$. Розбіжність результатів $\delta_{200} = 0,8\%$. При $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $d = 50$ г/кг сп, визначене по діаграмі, $\varphi_d = 60\%$. Оскільки $t < t_H(765\text{ мм.рт.ст.})$, то $\varphi = p_n / p_n(t)$, де згідно таблиці П1.6 додатків $p_n(50\text{ }^{\circ}\text{C}) = 92,51$ мм рт.ст. Тоді $\varphi \approx 61,53\%$. розбіжність результатів $\delta_{50} \approx 2,55\%$.

Відповідь: $\delta_{200} = 0,8\%$; $\delta_{50} \approx 2,55\%$. В даному випадку можливо скористатися діаграмою, побудованою для $B = 745$ мм рт.ст.

Приклад 7.32. Для приготування сушильного агенту вологе зовнішнє повітря з температурою $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і температурою точки роси $t_0^p = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ при тиску $B = 745$ мм рт.ст. подається в калорифер, де нагрівається до температури $t_k = 115\text{ }^{\circ}\text{C}$. Використовуючи h, d -діаграму, визначити питому кількість теплоти, що витрачається на нагрівання повітря у калорифері, та потенціал сушіння повітря після калориферу.

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.10. За значеннями t_0^p і t_0 наносять на діаграму точку А. При нагріванні у поверхневому калорифері вологовміст повітря, що нагрівається, не змінюється. На перетині лінії $d_A = \text{const}$ і ізотерми t_k наносять точку В. Питома кількість теплоти при ізобарному нагріві повітря $q = h_b - h_a = \mu_h(AB)$, де μ_h – масштаб використаної діаграми по вісі ентальпій; (AB) – довжина відрізка на діаграмі. Проводячи з точки В лінію $\tau = \text{const}$, до перетину її з ізогдрою $\varphi = 1$, визначають температуру t_b^M . Потенціал сушки $\varepsilon_b = t_k - t_b^M$; відрізок $(AB) = 218$ мм; масштаб $\mu_h = 0,103 \cdot 4,187$ кДж/кг сп мм; $t_b^M = 37,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тоді $q = 0,103 \cdot 4,187 \cdot 218 = 94$ кДж/кг сп; $\varepsilon_b = 115 - 37,7 = 77,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Відповідь: $q = 94$ кДж/кг сп; $\varepsilon_b = 77,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Приклад 7.33. Повітря з температурою $t_A = 110^\circ\text{C}$ і відносною вологістю $\phi_A = 7,3\%$ при $B = 745$ мм рт.ст. охолоджується у поверхневому повітроохолоджувачі до температури $t_c = 25^\circ\text{C}$. Використовуючи h, d -діаграму, визначити: за якої температури t_B почнеться конденсація водяної пари з повітря, яка кількість конденсату утворюється при охолодженні кожного кілограму абсолютно сухої частини повітря, яку питому кількість теплоти необхідно відводити від повітря в охолоджувачі?

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.11. За значеннями температури t_A і відносної вологості ϕ_A наносять на діаграму точку А. При охолодженні у поверхневому теплообміннику вологовміст повітря лишається незмінним доки не буде досягнута температура точки роси для стану повітря в точці А. Це буде у точці В на ізогідрі $\phi = 100\%$. Подальше охолодження насиченого повітря буде супроводжуватися конденсацією з нього води. По діаграмі визначаємо: $t_A^P = t_B = 40^\circ\text{C}$; $d_B = 50$ г/кг сп; $d_C = 20$ г/кг сп; $h_A = 246$ кДж/кг сп; $h_C = 76$ кДж/кг сп; $q = h_A - h_C = 246 - 76 = 170$ кДж/кг сп; $\Delta d = d_B - d_C = 50 - 20 = 30$ г/кг сп. З іншого боку, $q = \mu_h(A'C') = 0,103 \times 4,187 \cdot 394 = 170$ кДж/кг сп.; $\Delta d = \mu_d(B''C'') = 1 \cdot 30 = 30$ г/кг сп.

Відповідь: $t_B = 40^\circ\text{C}$, $q \approx 170$ кДж/кг сп., $\Delta d = 30$ г/кг сп.

Приклад 7.34. Вологе повітря з параметрами $t_0 = 5^\circ\text{C}$ і $d_0 = 3$ г/кг сп, яке містить у собі $m_1 = 5$ кг сухого повітря, змішується з вологим повітрям з параметрами $t_2 = 33^\circ\text{C}$ і $\phi_2 = 90\%$, яке містить у собі таку ж кількість m_2 сухого повітря. Створена суміш нагрівається в калорифері до температури $t_1 = 50^\circ\text{C}$. Визначити параметри стану $d'_{\text{см}}$ і h_1 суміші після калорифера та кількість теплоти, витрачену на нагрівання суміші у калорифері. Розрахунок виконати, використовуючи h, d -діаграму і прийнявши $B = 745$ мм рт.ст.

Розв'язання. Послідовність розв'язання пояснює рисунок 7.12. По заданих значеннях параметрів t_0 , d_0 і t_2 , ϕ_2 наносять на діаграму точки А і В. Процес змішування зобразиться прямою АВ, а точка С, яка характеризує стан суміші, розташується на середині відрізка АВ оскільки коефіцієнт рециркуляції $n = 1$. При $t_2 = 33^\circ\text{C}$ і $\phi_2 = 90\%$ вологовміст $d_2 = 29$ г/кг сп. Вологовміст $d_{\text{см}} = 16$ г/кг сп. Це означає, що точка С суміші лежить на ділянці лінії АВ, яка проходить нижче ізогідри $\phi = 100\%$, а при змішуванні повітря заданих станів частина водяної пари буде конденсуватися. Температура конденсату близька до температури мокрого термометру t^M і зв'язана з параметрами

$d'_{\text{см}}$ і $h'_{\text{см}}$ вологого насиченого повітря, які відповідають дійсному стану суміші повітря, співвідношенням: $(h_{\text{см}} - h'_{\text{см}}) / (d_{\text{см}} - d'_{\text{см}}) = 10^{-3} c_{\text{pp}} t^{\text{м}}$. В цьому співвідношенні три змінних $h'_{\text{см}}$, $d'_{\text{см}}$, $t^{\text{м}}$. Точку С дійсного стану суміші можна визначити на діаграмі, підбравши на лінії $\phi = 100\%$ точку, параметри якої $h'_{\text{см}}$ і $d'_{\text{см}}$ відповідали би наведеному співвідношенню. Це дозволить замість стану суміші з конденсацією, який зобразити неможливо, вказати дійсний стан суміші з параметрами $h'_{\text{см}}$ і $d'_{\text{см}}$. Для відшукування точки С дійсного стану суміші з точки С суміші на лінії АВ піднімаються по лінії сталої температури мокрого термометра $t^{\text{м}}$, яка проходить через цю точку, до перетину в точці С з лінією $\phi = 100\%$ (Рис. 7.12). Параметри суміші: вологовміст $d'_{\text{см}} = 15,5$ г/кг сп. і ентальпія $h'_{\text{см}} \approx 60$ кДж/кг сп. у точці С характеризують дійсний стан суміші. Точка D, яка характеризує стан суміші після калорифера, лежить на перетині ізотерми $t_1 = 50^\circ\text{C}$ з лінією $d'_{\text{см}} = 15,5$ г/кг сп. = const, проведеною з точки С. Параметри стану суміші в точці D: ентальпія $h_1 = 90$ кДж/кг сп.; $\phi = 20\%$. Кількість теплоти, підведена до повітря у калорифері: $Q = (m_1 + m_2)(h_1 - h'_{\text{см}}) = (m_1 + m_2)\mu_h(C'D)$, де μ_h - масштаб використаної діаграми по осі ентальпій; $Q = (5 + 5)(90 - 60) = 300$ кДж. Зауважимо, що різниця $(d_{\text{см}} - d'_{\text{см}})$ – це кількість вологи, яка сконденсувалася при змішуванні повітря.

Відповідь: $d'_{\text{см}} = 15,5$ г/кг сп.; $h'_{\text{см}} \approx 60$ кДж/кг сп.; $h_1 = 90$ кДж/кг сп.; $\phi = 20\%$; $Q = 300$ кДж.

Задачі

Задача 7.1. Стан вологого повітря при температурі $t = 25^\circ\text{C}$ визначено за допомогою гігрометра, яким виміряно температуру точки роси, що дорівнює $t^{\text{р}} = 18^\circ\text{C}$. Використовуючи таблиці термодинамічних властивостей водяної пари, розрахувати аналітично абсолютну вологість, вологовміст, ентальпію повітря, якщо барометричний тиск $B = 0,0988$ МПа.

Відповідь: $\phi = 65\%$; $d = 13,2$ г/кг сп.; $h = 58,6$ кДж/кг сп.; $\rho_{\text{вп}} \approx 1,17$ кг/м³
 $p_{\text{п}} = 2,0626 \cdot 10^{-3}$ МПа.; $V_{\text{вп}} \approx 0,878$ м³/кг сп.

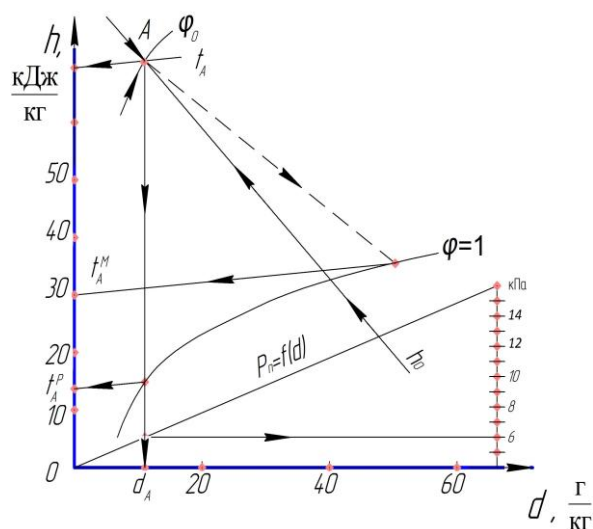


Рис.7.9. До прикладу 7.30.

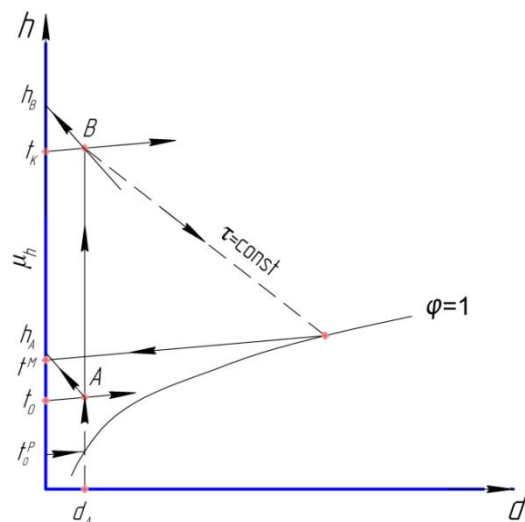


Рис.7.10. До прикладу 7.32.

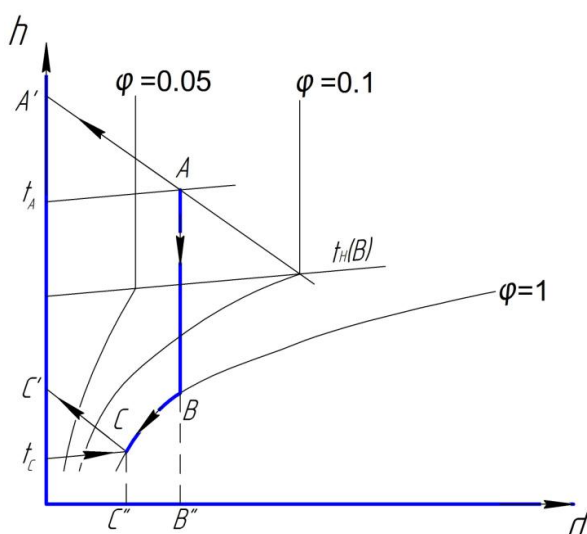


Рис.7.11. До прикладу 7.33.

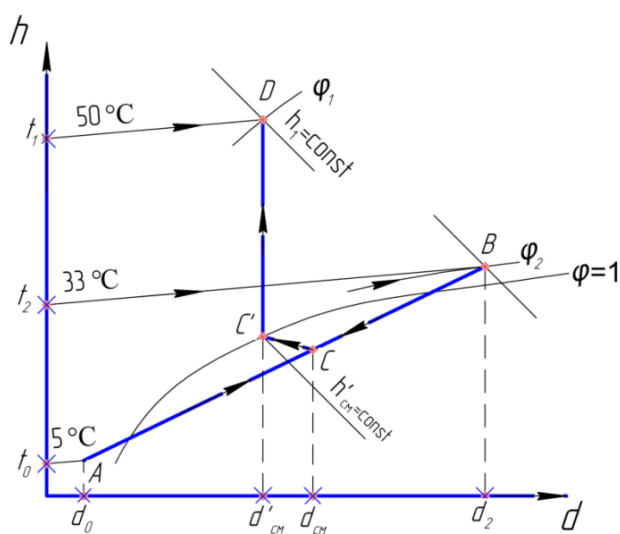


Рис.7.12. До прикладу 7.34.

Задача 7.2. Визначити розрахунковим шляхом основні параметри відп-

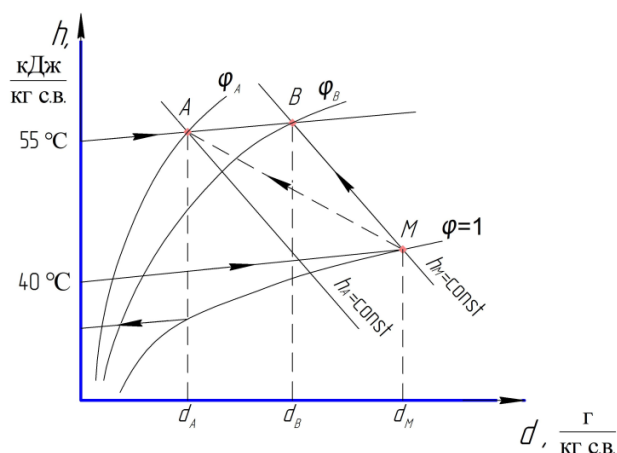


Рис. 7.13. До задачі 7.2.

рацьованого вологого повітря після сушильної камери, якщо виміряні психрометром, встановленим у вихідному повітропроводі, істинні температури повітря по сухому і «мокрому» термометрам дорівнюють відповідно $t = 55^\circ\text{C}$, $t^M = 40^\circ\text{C}$. Використати таблиці термодинамічних властивостей водяної пари. Барометричний тиск $B = 754$ мм рт.ст.

Вказівка: розглянути два варіанти розрахунків (див. рис 7.13): перший, коли параметри визначають з умови $h_m = \text{const}$ (точка В); другий, коли $h_m \neq h_A$ (точка А) і $10^3 (h_m - h_A) / (d_m - d_A) = c_{pp} t^M$.

Відповідь: варіант 1: $\phi_B = 47,4 \%$; $d_B = 42,94$ г/кг сп; $h_B = 167$ кДж/кг сп.;

варіант 2: $\phi_A = 40,9 \%$; $d_A = 42,52$ г/кг сп; $h_A = 165,9$ кДж/кг сп.

Задача 7.3. Який стан вологого повітря при температурі 50°C якщо парціальний тиск пари в ньому 8000 Па.

Відповідь: це ненасичене вологе повітря.

Задача 7.4. Стан вологого повітря характеризується значеннями температури t , відносної вологості ϕ і абсолютного тиску p , наведеними у таблиці:

$t, ^\circ\text{C}$	25	60	80	74	30	60	-9,8	82
$\phi, \%$	80	60	31	10	75	40	90	39
$p, \text{МПа}$	0,0993	0,0993	0,0993	0,0991	0,0980	0,0505	0,0993	0,0991

$t, ^\circ\text{C}$	60	150	130	130	50	22	25
$\phi, \%$	77	50	30	100	80	46	36
$p, \text{МПа}$	0,0991	0,0993	0,7	0,7	0,1013	0,0993	0,0993

розрахувати вологовміст d , ентальпію h , густину $\rho_{\text{вп}}$ та питомий об'єм $\nu_{\text{вп}}$ цього повітря.

Вказівка: при $t \geq t_n(B)$ відносна вологість $\phi = \delta_i / \hat{A}$.

Відповідь: результати розрахунків наведені в таблиці

$d, \text{г/кг сп}$	16,3	85,2	108	24,5	21	116	1,56	155
$h, \text{кДж/кг сп}$	65,55	283	367	138	83	364	-6	494
$\rho_{\text{вп}}, \text{кг/м}^3$	1,15	0,992	0,925	0,981	1,113	0,5	1,315	0,898
$\nu_{\text{вп}}, \text{м}^3 / \text{кг сп}$	0,883	1,093	1,196	1,043	0,916	2,243	0,762	1,283

$d, \text{г/кг сп}$	133	622	83	404	69	8	7,22
$h, \text{кДж/кг сп}$	355	1889	359	1243	229	42,3	40,36
$\rho_{\text{вп}}, \text{кг/м}^3$	0,976	0,663	5,68	5,05	1,052	1,167	1,16
$\nu_{\text{вп}}, \text{м}^3 / \text{кг сп}$	1,015	2,443	0,187	0,272	1,016	0,863	0,870

Задача 7.5. Визначити абсолютну вологість повітря, якщо у першому випадку парціальний тиск пари в ньому $p_{\text{п}} = 0,014$ МПа, температура $t = 60$ °С і барометричний тиск $B = 760$ мм рт.ст.; у другому випадку $p_{\text{п}} = 0,03$ МПа, $t = 80$ °С, $B = 745$ мм рт.ст.

Відповідь: $\rho_{\text{п}} = 0,0913$ кг/м³; $\rho_{\text{п}} = 0,185$ кг/м³.

Задача 7.6. Визначити парціальний тиск пари у повітрі, температура якого 43 °С і питома ентальпія 100 кДж/кг сп при барометричному тиску $B = 96972$ Па.

Відповідь: $p_{\text{п}} = 3320$ Па.

Задача 7.7. Розрахувати вологовміст, ентальпію, температури точки роси і мокрого термометра для повітря, стан якого характеризується параметрами: $t = 50$ °С; $\varphi = 70$ %; $B = 736$ мм рт.ст.

Вказівка: при розрахунку $t^{\text{м}}$ прийняти $h \approx h_{\text{м}}$.

Відповідь: $d = 60$ г/кг сп; $h = 206$ кДж/кг сп; $t^{\text{р}} = 42,5$ °С; $t^{\text{м}} \approx 44$ °С.

Задача 7.8. Визначити вологовміст і ентальпію вологого повітря при барометричному тиску 100 кПа, якщо істинна температура повітря по мокрому термометру 55 °С, а парціальний тиск сухого повітря у вологому 85 кПа. *Вказівка:* прийняти $h \approx h_{\text{м}}$.

Відповідь: $d = 109,8$ г/кг сп; $h = 358$ кДж/кг сп.

Задача 7.9. Розрахувати масові та об'ємні частки сухого повітря і водяної пари у вологому повітрі, яке має вологовміст 10 г/кг сп за нормальних умов, а також густину, питому газову сталу, молекулярну масу цього вологого повітря.

Відповідь: $g_{\text{сп}} = 0,9901$; $g_{\text{п}} = 0,0099$; $r_{\text{сп}} = 0,9842$; $r_{\text{п}} = 0,0158$; $\rho_{\text{вп}} \approx 1,285$ кг/м³; $\mu_{\text{вп}} = 28,786$ кг/моль; $R_{\text{вп}} = 289$ Дж/(кгК).

Задача 7.10. Вентилятор подає 1000 м³/год вологого повітря з температурою 20 °С і відносною вологістю 60 % при барометричному тиску 757 мм рт.ст. Яка масова кількість водяної пари і сухого повітря подається вентилятором?

Відповідь: $L_{\text{сп}} = 1181,51$ кг/год; $L_{\text{п}} = 10,45$ кг/год.

Задача 7.11. Під яким барометричним тиском знаходиться вологе повітря, якщо його температура $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура мокрого термометра і точки роси відповідно $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Відповідь: $B = 754\text{ мм рт.ст.}$

Задача 7.12. Обчислити зведену ізобарну питому масову теплоємність вологого повітря, яке має: температуру $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вологовміст 50 г/кг сп. при атмосферному тиску $B = 760\text{ мм рт.ст.}$; температуру $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вологовміст 23 г/кг сп.

Відповідь: $\tilde{c} = 1,13\text{ кДж/(кгК)}$; $\tilde{c} = 1,048\text{ кДж/(кгК)}$.

Задача 7.13. Масова витрата абсолютно сухого повітря, яке міститься у вологому повітрі, дорівнює $0,89\text{ кг/с}$. Вологе повітря має температуру $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на вході в калорифер і $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ після підігрівання в калорифері. Вологовміст повітря $10,4\text{ г/кг сп.}$ Барометричний тиск $B = 99325\text{ Па}$. Розрахувати об'ємну витрату повітря на вході і виході калорифера.

Відповідь: $V_{\text{вх}} = 0,885\text{ м}^3/\text{с}$; $V_{\text{вих}} = 1,077\text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 7.14. В якому з двох станів вологого повітря: при $t_1 = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\phi_1 = 4\text{ \%}$ або при $t_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\phi_2 = 50\text{ \%}$ його густина буде більшою, якщо $B_1 = B_2$?

Відповідь: $\rho_1 = 0,9\text{ кг/м}^3$; $\rho_2 = 1,11\text{ кг/м}^3$; результат свідчить про переважний вплив на густину зміни температури повітря.

Задача 7.15. Повітря, що знаходиться під тиском $p = 100\text{ кПа}$, має абсолютну вологість $\rho_{\text{п}} = 0,014\text{ кг/м}^3$. Визначити відносну вологість і температуру точки роси цього повітря при температурах: $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_2 = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Відповідь: $t_1^{\text{р}} = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\phi_1 = 81\text{ \%}$; $t_2^{\text{р}} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\phi_2 = 2,5\text{ \%}$.

Задача 7.16. Визначити стан пари у вологому повітрі, в якому при тиску $p = 0,1\text{ МПа}$ і температурі $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ парціальний тиск водяної пари $p_{\text{п}} = 0,01\text{ МПа}$. Розрахувати парціальний тиск сухого повітря, температуру точки роси, абсолютну і відносну вологість, вологовміст, ентальпію, густину, середню молекулярну масу, питому газову сталу цього повітря.

Відповідь: пара перегріта, повітря ненасичене; $p_{\text{сп}} = 0,09\text{ МПа}$; $\phi = 31,9\text{ \%}$; $\rho_{\text{абс}} = 0,1982\text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{вп}} = 0,997\text{ кг/м}^3$; $\mu_{\text{вп}} = 27,86\text{ кг/моль}$; $R_{\text{вп}} = 298,4\text{ Дж/(кгК)}$; $d = 70\text{ г/кг сп.}$; $h \approx 255\text{ кДж/кг сп.}$

Задача 7.17. Розрахувати теплову потужність калорифера сушильної установки, до якого надходить $L_{\text{вп}}$ кілограм на секунду вологого повітря з температурою t_1 і відносною вологістю φ_1 і нагрівається в ньому до температури t_2 . Барометричний тиск $B = 99325$ Па. Вихідні дані для розрахунку: а) $t_1 = 24^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = 70\%$; $t_2 = 90^\circ\text{C}$; $L_{\text{вп}} = 2$ кг/с; б) $t_1 = 20^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = 50\%$; $t_2 = 90^\circ\text{C}$; $L_{\text{вп}} = 10$ кг/с; в) $t_1 = 10^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = 60\%$; $t_2 = 80^\circ\text{C}$; $L_{\text{вп}} = 3$ кг/с; г) $t_1 = 28^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = 40\%$; $t_2 = 70^\circ\text{C}$; $L_{\text{вп}} = 5$ кг/с; д) $t_1 = 12^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = 84\%$; $t_2 = 60^\circ\text{C}$; $L_{\text{вп}} = 0,66$ кг/с; е) $t_1 = -10^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = 80\%$; $t_2 = 40^\circ\text{C}$; $L_{\text{вп}} = 1$ кг/с.

Відповідь: $Q_a = 141,2$ кВт; $Q_b = 705$ кВт; $Q_g = 211$ кВт; $Q_e = 216,6$ кВт;
 $Q_d = 31,45$ кВт; $Q_e = 50,13$ кВт.

Задача 7.18. У калорифер надходить вологе повітря, стан якого характеризується температурою $t_1 = 20^\circ\text{C}$ і температурою точки роси $t_1^p = 5^\circ\text{C}$. Розрахувати, як зміниться відносна вологість і потенціал сушіння повітря після нагрівання його у калорифері до $t_2 = 90^\circ\text{C}$. Барометричний тиск $B = 99325$ Па.

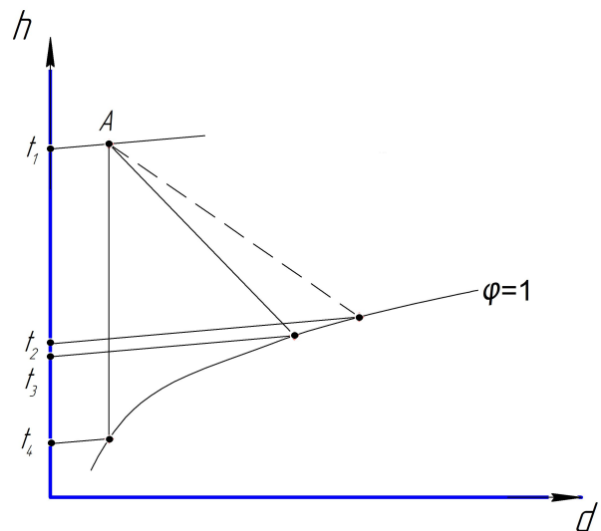
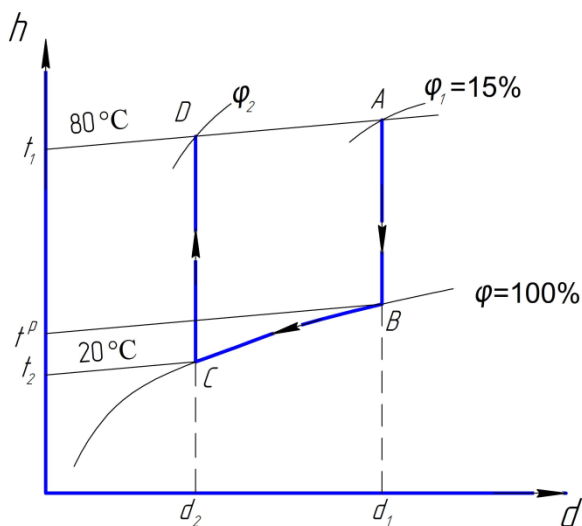
Відповідь: $\varphi_1 = 37,3\%$; $\varphi_2 = 1,24\%$; $\varepsilon_1 = 8,5^\circ\text{C}$; $\varepsilon_2 = 58,4^\circ\text{C}$; $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 6,87$.

Задача 7.19. Вологе повітря з температурою $t_1 = 40^\circ\text{C}$ і відносною вологістю $\varphi_1 = 60\%$ охолоджується у поверхневому охолоджувачі до $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Витрата вологого повітря $L_{\text{вп}} = 1$ кг/с. Розрахувати кількість пари, що конденсується з повітря і кількість теплоти, що відводиться від повітря у охолоджувачі, протягом однієї години. $B = 745$ мм рт.ст.

Відповідь: $W = 49$ кг; $Q = 198400$ кДж.

Задача 7.20. Вологе повітря з температурою 80°C і відносною вологістю 15% охолоджується у поверхневому охолоджувачі до 20°C , після чого повторно нагрівається до 80°C . Розрахувати температуру точки роси повітря, що надходить у охолоджувач, його вологовміст до та після охолодження, відносну вологість після повторного нагріву. Барометричний тиск $B = 745$ мм.рт.ст. Див. рис. 7.14.

Відповідь: $t^p = 39,3^\circ\text{C}$; $d_1 = 47,9$ г/кг сп.; $d_2 = 15$ г/кг сп.; $\varphi_2 = 5\%$.



Задача 7.21. Повітря з температурою t_1 і відносною вологістю ϕ_1 охолоджується у трубчастому протитоковому теплообміннику до температури точки роси холодною водою, яка при цьому нагрівається від температури t_2' до температури t_2'' . Площа поверхні теплообміну F , коефіцієнт теплопередачі у теплообміннику k . Розрахувати масові витрати повітря, що надходить на охолодження, та охолоджуючої води. Вихідні дані для розрахунку наведені у таблиці П2.11 додатків.

Задача 7.22. Вологе повітря, яке характеризується у стані А параметрами x_1 і x_2 , змінює свій стан у процесі $x_3 = \text{const}$ до стану В, в якому параметр стану x_4 набуває заданого значення. розрахувати аналітично усі параметри стану вологого повітря у станах А та В, використовуючи таблиці термодинамічних властивостей водяної пари. Вихідні дані для розрахунку обрати з таблиці П2.12 додатків. Прийняти $B = 745$ мм рт. ст. Пояснити фізичну сутність процесу.

Задача 7.23. Стан вологого повітря в h, d -діаграмі характеризує точка А на рис. 7.15). Яка з температур t_1, t_2, t_3, t_4 буде для точки А температурою: точки роси? мокрого термометру при ізобарно-адіабатному випаровуванні води у повітря? мокрого термометра при випаровуванні води з температурою вище $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ у повітря?

Задача 7.24. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст визначається за допомогою термометра і волосяного гігromетра. Показання приладів $t = 12$ °C і $\varphi = 52$ %. Визначте за допомогою h, d -діаграми інші параметри стану цього повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: $h = 25$ кДж/кг сп; $d \approx 5$ г/кг сп; $p_{\pi} \approx 666$ Па; $t^p = 3,3$ °С; $t^m = 7$ °С;
 $\varepsilon = 5$ °С.

Задача 7.25. Вологе повітря при барометричному тиску $B = 745$ мм рт.ст має температуру точки роси $t^p = 25$ °С і температуру мокрого термометра $t^m = 34,5$ °С. Визначте по h, d -діаграмі інші параметри цього повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: $d = 20,2$ г/кг сп; $t = 70$ °С; $\varphi = 3,5$ %; $h = 123,5$ кДж/кг сп; $\varepsilon = 35,5$ °С; $p_{\pi} = 23,5$ мм рт.ст.

Задача 7.26. Виміряні термометрами психрометру температури вологого повітря $t = 30$ °С і $t^m = 15$ °С. Визначте по h, d -діаграмі інші параметри цього повітря. $B = 745$ мм рт.ст. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: $h = 42$ кДж/кг сп; $d = 4,6$ г/кг сп; $p_{\pi} = 0,75$ кПа; $t^p = 2,5$ °С; $\varphi = 17,5$ %.

Задача 7.27. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. визначається за допомогою конденсаційного гігрометра, яким виміряно температуру точки роси $t^p = 8$ °С при температурі повітря $t = 20$ °С. Визначте за допомогою h, d -діаграми відносну вологість, вологовміст і ентальпію повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: $h = 37,8$ кДж/кг сп; $d = 7$ г/кг сп; $\varphi = 48$ %.

Задача 7.28. Стан повітря при барометричному тиску $B = 745$ мм рт.ст. характеризується параметрами: а) $t = 50$ °С, $\varphi = 30$ %; б) $t = 80$ °С, $p_{\pi} = 1,5$ кПа; в) $h = 200$ кДж/кг сп, $t = 60$ °С; г) $t = 50$ °С, $\varepsilon = 20$ °С. Визначте за допомогою h, d -діаграми інші параметри вологого повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: а) $d = 24$ г/кг сп; $h = 112,3$ кДж/кг сп; $t^p = 27,5$ °С; $t^m = 32,4$ °С; $\varepsilon = 17,6$ °С; $p_{\pi} = 27,3$ мм рт.ст. б) $d = 10$ г/кг сп; $t^p = 14$ °С; $t^m = 31,6$ °С; $h = 106,7$ кДж/кг сп; $\varepsilon = 48,4$ °С; $\varphi = 3,2$ %.
в) $\varphi = 40$ %; $t^p = 41,5$ °С; $t^m = 43,6$ °С; $\varepsilon = 16,4$ °С; $p_{\pi} = 59$ мм рт.ст. г) $d = 19$ г/кг сп; $\varphi \approx 24$ %; $t^p = 24$ °С; $t^m = 30$ °С; $h = 99,3$ кДж/кг сп; $p_{\pi} = 22$ мм рт.ст.

Задача 7.29. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. визначається температурою точки роси $t^p = 15$ °C і ентальпією $h = 99,3$ кДж/кг сп. Визначте за допомогою h, d -діаграми температури сухого і «мокрого» термометрів цього повітря, його відносну вологість, потенціал сушіння і вологовміст. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: $t = 70$ °C; $t^m = 30$ °C; $\varepsilon = 40$ °C; $d = 11$ г/кг сп; $\varphi \approx 55$ %.

Задача 7.30. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. визначається температурою $t = 90$ °C; і вологовмістом $d = 47$ г/кг сп. Визначте за допомогою h, d -діаграми інші параметри цього стану повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: $\varphi = 10$ %; $t^m = 45,2$ °C; $t^p \approx 39$ °C; $\varepsilon = 44,8$ °C; $p_{\pi} = 66,7$ кПа; $h \approx 216$ кДж/кг сп.

Задача 7.31. Стан вологого повітря характеризується відотною вологістю $\varphi = 30$ % і вологовмістом $d = 14$ г/кг сп при $B = 745$ мм рт.ст. Визначте за допомогою h, d -діаграми інші параметри цього стану повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: $t = 40$ °C; $t^m = 25$ °C; $t^p = 19$ °C; $\varepsilon = 15$ °C; $h = 72,7$ кДж/кг сп; $p_{\pi} = 2$ кПа.

Задача 7.32. Стан вологого повітря визначається температурою $t^m = 36$ °C і відотною вологістю $\varphi = 30$ % при барометричному тиску $B = 745$ мм рт.ст. Визначте за допомогою h, d -діаграми інші параметри цього стану повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь: $t = 55$ °C; $d = 31$ г/кг сп; $t^p = 32$ °C; $h \approx 136$ кДж/кг сп; $d_{\max} = 118$ г/кг сп; $p_{\pi, \max} = 118,5$ мм рт.ст.

Задача 7.33. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. визначається температурою t і відотною вологістю φ , значення яких наведені в таблиці:

$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	20	40	40	60	60	100
$\varphi, \text{ \%}$	60	80	30	10	30	5

Визначте за допомогою h, d -діаграми інші параметри цього стану повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь:

t^p , °C	13	35,6	19	17,5	36	33,3
t^m , °C	15,5	36,3	25	29	39,8	43
d , г/кг сп	9,3	39,8	14	13	40	33,5
h , кДж/кг сп	44,4	140,1	76	93	166	190
p_n , кПа	1,33	5,85	2,15	1,81	5,9	5,1

Задача 7.34. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. визначається температурами точки роси t^p і мокрого термометру t^m , значення яких наведені в таблиці:

t^p , °C	13	35,6	19	17,5	36	33,3
t^m , °C	15,5	36,3	25	29	39,8	43

Визначте за допомогою h,d -діаграми інші параметри цього стану повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь:

t , °C	20	40	40	60	60	100
ϕ , %	60	80	30	10	30	5
d , г/кг сп	9,3	38,8	14	13	40	33,5
h , кДж/кг сп	44,4	140,1	76	93	166	190
p_n , кПа	1,33	5,85	2,15	1,81	5,9	5,1

Задача 7.35. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. визначається вологовмістом d і ентальпією h , значення яких наведені у таблиці:

d , г/кг сп	9,3	38,8	14	13	40	33,5
h , кДж/кг сп	44,4	140,1	76	93	166	190

Визначте за допомогою h,d -діаграми інші параметри цього стану повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь:

t , °C	20	40	40	60	60	100
ϕ , %	60	80	30	10	30	5
t^p , °C	13	35,6	19	17,5	36	33,3
t^m , °C	15,5	36,3	25	29	39,8	43
p_n , кПа	1,33	5,85	2,15	1,81	5,9	5,1

Задача 7.36. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. визначається відносною вологістю ϕ і парціальним тиском водяної пари у повітрі p_n , значення яких наведені в таблиці:

ϕ , %	60	80	30	10	30	5
p_n , кПа	1,33	5,85	2,15	1,81	5,9	5,1

Визначте за допомогою h,d -діаграми інші параметри цього стану повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь:

t , °C	20	40	40	60	60	100
d , г/кг сп	9,3	38,8	14	13	40	33,5
t^m , °C	15,5	36,3	25	29	39,8	43
t^p , °C	13	35,6	19	17,5	36	33,3
h , кДж/кг сп	44,4	140,1	76	93	166	190

Задача 7.37. Стан вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. визначається температурою мокрого термометра t^m і парціальним тиском δ_i , значення яких наведені в таблиці:

t^m , °C	15,5	36,3	25	29	39,8	43
p_n , кПа	1,33	5,85	2,15	1,81	5,9	5,1

Визначте за допомогою h,d -діаграми інші параметри цього стану повітря. Зобразіть послідовність дій на діаграмі.

Відповідь:

t , °C	20	40	40	60	60	100
ϕ , %	60	80	30	10	30	5
d , г/кг сп	9,3	38,8	14	13	40	33,5
h , кДж/кг сп	44,4	140,1	76	93	166	190
t^p , °C	13	35,6	19	17,5	36	33,3

Задача 7.38. Повітря при атмосферному тиску $B = 745$ мм рт.ст. має температуру 200 °C і вологовміст 50 г/кг сп. Визначте, користуючись h,d -діаграмою, інші параметри цього повітря.

Відповідь: $t^p = 40$ °C; $t^m = 55$ °C; $\varepsilon = 145$ °C; $\phi \approx 7,5$ %; $h \approx 345$ кДж/кг сп.

Задача 7.39. Повітря при атмосферному тиску $B = 745$ мм рт.ст. має температуру $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відносну вологість 30% . Визначте, користуючись h, d – діаграмою, інші параметри цього повітря.

Відповідь: $d = 24$ г/кг сп; $p_{\text{п}} = 3,8$ кПа ($27,5$ мм рт.ст.); $t^{\text{р}} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t^{\text{м}} \approx 33\text{ }^{\circ}\text{C}$; $h \approx 113$ кДж/кг сп; $p_{\text{сп}} = 745 - 27,5 = 717,5$ мм рт.ст.

Задача 7.40. Показання термометрів психрометра при тиску $B = 745$ мм рт.ст. такі: по сухому термометру $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, по «мокрому» – $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначте, користуючись h, d – діаграмою, інші параметри цього повітря. Порівняйте знайдене значення відносної вологості повітря зі значенням, визначеним з психрометричної таблиці П.1.5 додатків. Зобразіть схему розв’язання задачі.

Відповідь: $\varphi_{\text{д}} = 72,5\%$; $\varphi_{\text{шт}} = 71\%$; $d = 35$ г/кг сп; $t^{\text{р}} = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; $h \approx 130$ кДж/кг сп; $p_{\text{п}} \approx 40$ мм рт.ст.

Задача 7.41. Визначені при $B = 745$ мм рт.ст. температура повітря $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; і температура його точки роси $t^{\text{р}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Визначте по h, d – діаграмі інші параметри повітря.

Відповідь: $d = 50$ г/кг сп; $t^{\text{м}} = 51,4\text{ }^{\circ}\text{C}$; $h = 289,5$ кДж/кг сп; $\varphi \approx 7,3\%$; $p_{\text{п}} \approx 55$ мм.рт.ст.; $\varepsilon = 98,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 7.42. Температуру за мокрим термометром для заданого стану повітря визначають по h, d – діаграмі, використовуючи τ – лінії. У тих випадках, коли на діаграмі не нанесені τ – лінії, для визначення цієї температури використовують лінії $h = \text{const}$. Визначте, як відрізняються значення температур за мокрим термометром, визначені з використанням τ – ліній та ліній $h = \text{const}$, у наступних ситуаціях при $B = 745$ мм рт.ст.: а) $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $d = 13$ г/кг сп; б) $129,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; 52 г/кг сп; в) $350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 120 г/кг сп; г) $700\text{ }^{\circ}\text{C}$; 132 г/кг сп.

Відповідь: а) $\Delta = 0,45\%$; б) $\Delta = 1\%$; в) $\Delta = 1,47\%$; г) $\Delta = 1,77\%$. Як бачимо, у достатньо широкому діапазоні станів вологого повітря, можна використати лінії $h = \text{const}$, які проходять через точку, що відповідає заданому стану вологого повітря.

Задача 7.43. Вологовміст повітря при $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносній вологості $\varphi = 20\%$ і $B = 765$ мм рт.ст. становить $d = 63,65$ г/кг сп. Яка похибка буде при знаходженні цього вологовмісту по h, d – діаграмі, побудованій при

$B = 745$ мм рт.ст. Чи можна у ситуації, що розглядається, при $d = \text{const}$ скористатися співвідношенням $B_1/B_2 = \varphi_1/\varphi_2$?

Відповідь: $\Delta \approx 3 \%$; можна, якщо це задовольняє вимогам до точності розрахунку.

Задача 7.44. Зобразіть та опишіть, якими лініями в h, d -діаграмі станів вологого повітря зображують наступні процеси: а) нагрівання повітря в поверхневому калорифері; б) охолодження повітря в поверхневому охолоджувачі до заданої температури при температурі охолоджуючої поверхні вище температури точки роси t^p повітря, що охолоджується, та нижче t^p ; в) ізобарно-адіабатичний процес зволоження повітря водяною парою, що випаровується при температурі води 0°C ; г) зволоження повітря водяною парою, що випаровується при температурі води вище 0°C ; д) адіабатного змішування повітря різних станів при відсутності конденсації водяної пари та при частковій конденсації пари.

Задача 7.45. Вологе повітря, яке знаходиться в стані А, що характеризується параметрами X_A і Y_A при барометричному тиску $B = 745$ мм рт.ст., нагрівається у поверхневому теплообміннику до стану В, що характеризується параметром Z_B . Визначте теоретичну витрату теплоти в теплообміннику на нагрівання одного кілограму вологого повітря, що надходить, використовуючи h, d -діаграму. Вихідні дані наведені в таблиці П2.13 додатків. Зобразіть схему розв'язання. Вказівка: $L_{\text{вп}} = L_{\text{ас}}(1 + 10^{-3}d)$.

Відповідь: а) $q_{\text{вп}} = 55,75$ кДж/кг вп; б) $96,92$ кДж/кг вп; в) $128,56$ кДж/кг вп; г) $148,6$ кДж/кг вп; д) $39,68$ кДж/кг вп; е) $75,6$ кДж/кг вп; ж) $37,7$ кДж/кг вп.

Задача 7.46. Стан А вологого повітря при $B = 745$ мм рт.ст. характеризують значення параметрів X_A і Y_A . Повітря охолоджується в поверхневому охолоджувачі до стану В, який характеризують значення параметра Z_B . Визначте, використовуючи h, d -діаграму, питому кількість теплоти, що відводиться від повітря в охолоджувачі, а також кількість водяної пари, що сконденсувалася, якщо конденсація буде мати місце. Вихідні дані наведені в таблиці П2.14 додатків. Зобразіть схему розв'язання задачі.

Відповідь: а) $\Delta d = 8,5$ г/кг сп; $q = 117$ кДж/кг; б) 4 ; $89,3$; в) 0 ; $64,2$; г) 0 ; $64,2$; д) 0 ; $37,46$; е) $20,3$; $111,3$; ж) 8 ; 51 .

Задача 7.47. Для приготування сушильного агенту, який подається на вхід калорифера сушильної установки, змішуються свіже повітря з параметрами h_A і d_A з відпрацьованим повітрям з параметрами h_B і d_B . Зазначте на рисунку 7.16 точки, які відповідають стану суміші при наступних значеннях коефіцієнту рециркуляції n : а) 1/4; б) 2/3; в) 3/2; г) 4. Якому значенню n відповідає положення точки С з параметрами h_C і d_C ? Обґрунтуйте відповідь.

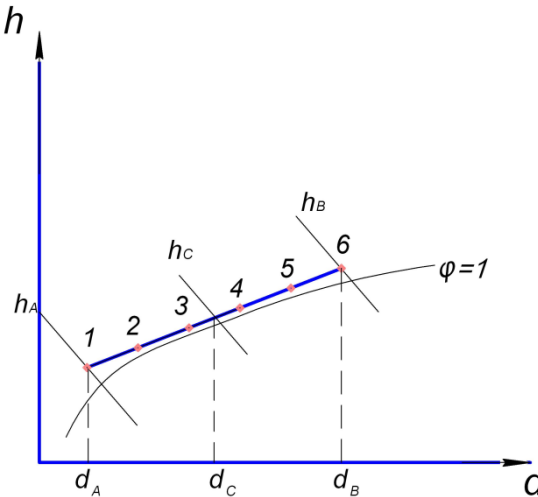


Рис. 7.16. До задачі 7.47.

Відповідь: а) точка 2; б) 3; в) 4; г) 5; в точці С $n = 1$.

Задача 7.48. Змішуються вологе насичене повітря з температурою 5°C і повітря, ентальпія якого 200 кДж/кг сп і парціальний тиск водяної пари у якому 65 мм рт.ст. Барометричний тиск $B = 745 \text{ мм рт.ст.}$ Використовуючи h, d -діаграму, визначте, яка кількість рідинної вологи утворюється при змішуванні, якщо масова витрата абсолютно сухої частини повітря першого стану 1 кг/с , а другого – $0,5 \text{ кг/с}$.

Відповідь: $W = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ або $21,6 \text{ кг рідини на годину}$.

2.8. ТЕРМОДИНАМІКА ПОТОКУ

Мета занять – поглибити знання про процес течії робочих тіл, сформулювати вміння та навички розрахунку процесу витікання через прості та комбіновані сопла і дроселювання робочих тіл.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Необхідно знати: фізичну сутність процесів течії, витікання та дроселювання, приклади наявності та використання цих процесів в техніці; мету термодинамічного дослідження (аналізу) процесів течії та основні припущення, за яких проводять дослідження; основні рівняння для потоку (рівняння нерозривності в інтегральній та диференціальній формах, рівняння механічної енергії, рівняння Першого закону термодинаміки); суть понять «ентальпія та температура повного адіабатного гальмування потоку»; що таке місцева швидкість звуку в газі та як вона розраховується; що таке сопло, геометричне сопло, просте та комбіноване сопло, дифузор; рівняння обернення геометричного впливу; критичний режим витікання, його фізичний зміст, критичне співвідношення тисків $\beta_{кр}$; значення $\beta_{кр}$ для газів і водяної пари; характер залежності швидкості витікання та масової витрати газу від відношення тисків β ; формули для розрахунку швидкості витікання та масової витрати газу чи пари при $\beta \geq \beta_{кр}$; порядок розрахунку витікання з простих і комбінованих сопел та методику використання h,s -діаграм при розрахунках; основне рівняння для адіабатного дроселювання; сутність диференційного та інтегрального адіабатного дросель-ефекту, температури інверсії; методику розрахунку дроселювання водяної пари по h,s -діаграмі.

Рекомендована література: [1.1], [1.2], [1.4], [3.1], [3.2].

Рекомендації до вивчення матеріалу по темі

Перш за все, необхідно уявити фізичну сутність процесів течії, витікання та дроселювання. Засвоїти мету термодинамічного аналізу процесів течії та основні припущення, за яких проводять аналіз; звернути увагу на те, що аналізують стаціонарну, одномірну, енергетично ізольовану, оборотну течію. Уявити, що основою, на якій будується вся теорія витікання, слугує рівняння Першого закону термодинаміки для потоку. Вивчити: інтегральну та диференціальну форми запису цього рівняння, звернувши увагу на фізичну сутність окремих його членів; припущення, за яких це рівняння записується у вигляді $\delta q = dh + dw^2/2$; інтегральну та диференціальну форми запису рівнянь

нерозривності (суцільності) потоку, механічної енергії та Другого закону термодинаміки для потоку.

Уявити сутність процесу повного адіабатного гальмування потоку та параметрів гальмування (особливо ентальпії та температури), які характеризують кінцевий стан робочого тіла в цьому процесі. Запам'ятати, що для енергетично ізольованого потоку максимально можлива швидкість потоку $w_{\max} = \sqrt{2h_0}$, де h_0 – ентальпія гальмування. Уявити, що таке місцева швидкість звуку в потоці; запам'ятати, що для ідеального газу ця швидкість $a = \sqrt{kpv} = \sqrt{kRT}$.

Вивчити, що являють собою сопло, геометричне сопло, просте та комбіноване сопло, дифузор. Звернути увагу на те, що з рівняння Бернуллі $w dw = -v dp$ витікає, що для збільшення швидкості потоку на виході з каналу необхідно збільшити наявний перепад тисків, а щоб перетворити потенційну енергію тиску в кінетичну енергію потоку, канал має мати відповідну форму. При течії потоку через сопло площа поперечного перерізу каналу сопла може збільшуватися або зменшуватися ($f = mv/w$) в залежності від темпів росту швидкості течії w та питомого об'єму v потоку. Вивчити рівняння обертання геометричного впливу, проаналізувати, як впливає зміна перерізу каналу на потік, використовуючи газодинамічний критерій Маха. Уявити, що в залежності від швидкості потоку на вході в канал цей канал при незмінній його геометрії може бути як соплом, так і дифузором. З'ясувати, в яких випадках необхідно робити сопло таким, що звужується, а в яких – таким, що розширюється.

Вивчаючи процес витікання з сопел, необхідно: уявити сутність критичного стану при витіканні; ясно уявляти, чому в циліндричних і каналах, що звужуються, швидкість потоку не може перевищити критичну (звукову). Слід звернути увагу на розрахунок швидкості витікання та масової витрати робочого тіла із сопел, що звужуються; зрозуміти, що при відношенні тисків більше критичного – розширення потоку в каналі такого сопла повне, а при відношенні тисків менше критичного – неповне. Ця обставина визначає відміну як методик розрахунку швидкості витікання та масової витрати, так і розрахункових формул в цих ситуаціях. Бажано запам'ятати значення критичного відношення тисків $\beta_{\text{кр}}$ для ідеальних газів різної атомності, сухої насиченої та перегрітої водяної пари.

Вивчаючи методику розрахунку витікання з простих сопел, слід звернути увагу на наступне. Основною формулою для розрахунку швидкості адіабатного витікання є $w = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$. З неї отримують, як окремі випадки, формули, які справедливі лише для ідеального газу. З метою спрощення роз-

рахунків залежність показника адіабати від температури не враховують, приймаючи $k = c_p/c_v = \text{const}$. Процес адіабатного витікання пари або реально-го газу розраховують за допомогою таблиць термодинамічних властивостей пари або h,s -діаграми. Тому потрібно вміти зображати адіабатний процес витікання в h,s -діаграмі.

Всі реальні процеси протікають з тертям, тому необхідно уявити, як впливає тертя на адіабатний процес витікання, як розраховувати процеси з тертям та зображати їх в h,s -діаграмі.

Уявити можливість отримання надзвукової швидкості потоку при його витіканні з сопла Лавалю та умови переходу через місцеву швидкість звуку. Вивчити методику розрахунку витікання через сопло Лавалю та розрахункові формули для швидкості витікання та масової витрати робочого тіла.

Вивчаючи адіабатний процес дроселювання, слід чітко уявити, що це необоротний процес, в якому перепад тисків в потоці спрацьовується на подолання потоком місцевих опорів (сил тертя), а зростанням кінетичної енергії потоку можна знехтувати. Необхідно запам'ятати, що при адіабатному дроселюванні ентальпія робочого тіла має однакові значення лише до та після дроселювання. Умову $h_1 = h_2$ неможна ототожнювати з оборотним процесом при постійній ентальпії; рівність $h_1 = h_2$ строго справедлива лише в ідеальному випадку, а в реальних процесах, коли швидкість потоку іноді суттєво змінюється, ця рівність виконується наближено.

Слід уявити: причини, які в процесі дроселювання призводять до зміни температури робочого тіла – до дросель-ефекту; сутність диференційного та інтегрального дросель-ефектів, явища інверсії та температури інверсії.

Вивчити особливості дроселювання водяної пари, звернувши увагу на те, що при дроселюванні зменшується енергетична цінність потоку та, як наслідок, – зменшується наявна робота в теплових двигунах та питома холодопродуктивність в холодильних установках. Розв'язувати задачі на дроселювання водяної пари необхідно за допомогою h,s -діаграми та ілюструвати відповідними схематичними зображеннями в h,s -координатах, пам'ятаючи, що необоротний процес дроселювання може бути зображений лише умовно штриховою лінією, яка співпадає в початковій та кінцевій точках з ізоентальпою.

Слід враховувати, що кінцевий стан пари при дроселюванні залежить від початкових значень (перед дроселюванням) параметрів пари. Волога пара під тиском 4-5 МПа може перетворитися на суху насичену або навіть перегріту. Перегріта пара при дроселюванні може перетворитися на насичену і знову перейти в перегрітий стан.

Питання для самоконтролю знань

1. Що таке технічна робота потоку газу? Який вона може мати знак і чому? Який потік називають механічно ізольованим, енергетично ізольованим та адіабатним?
2. Яке припущення дозволяє процеси в потоці, який рухається з кінцевою швидкістю, вважати оборотними?
3. Що додатково враховується при виведенні рівняння Першого закону термодинаміки для потоку в порівнянні з рівнянням для нерухомого газу? Що таке робота проштовхування, як вона розраховується та який знак може мати?
4. Що таке рівняння нерозривності або суцільності? Як отримати це рівняння в диференційній формі?
5. Що таке сопло та дифузор, для здійснення яких процесів вони застосовуються? Наведіть приклади технічного використання цих пристроїв.
6. Спростіть рівняння Першого закону термодинаміки для потоку стосовно до процесів в соплах та дифузорах. Покажіть за допомогою отриманого спрощеного рівняння, що зміна швидкості потоку в таких процесах завжди має протилежний знак до зміни тиску.
7. Спростіть рівняння Першого закону термодинаміки для потоку для випадку адіабатного витікання через сопло та отримайте з нього вираз для швидкості потоку за соплом в загальному вигляді $w = \sqrt{2(h_2 - h_1)}$ та для застосування до ідеального газу.
8. Як пов'язана зміна перерізу профілю каналу із зміною швидкості потоку та питомим об'ємом?
9. Перетворіть рівняння нерозривності (суцільності) потоку, записане в диференційній формі, в рівняння для випадку витікання ідеального газу.
10. Сформулюйте закон геометричного обернення впливу та обґрунтуйте його аналізом диференційного рівняння нерозривності (суцільності) потоку для випадку витікання ідеального газу.
11. Яким умовам повинні відповідати сопло та дифузор для дозвукового та надзвукового режимів течії?
12. Як фізично пояснити, чому при зниженні зовнішнього тиску нижче критичного швидкість витікання через сопло, що звужується, перестає зростати та не може досягти надзвукової швидкості?
13. Обґрунтуйте будову сопла Лавалю за допомогою закону геометричного обернення дії (впливу). Яку форму повинен мати дифузор, якщо швидкість потоку на виході більше критичної?

14. Який процес називають дроселюванням? Як протікає процес адіабатного дроселювання? Як його можна здійснити практично? Наведіть приклади використання в техніці.
15. Які припущення покладені в основу ідеалізації реального процесу дроселювання в технічній термодинаміці?
16. На що витрачається робота розширення газу при дроселюванні? Чому в результаті процесу адіабатного дроселювання ентальпія газу не змінюється? Можна цей процес називати ізентальпійним?
17. Що таке диференційний та інтегральний ефекти дроселювання? Як та чому змінюється температура реального газу при дроселюванні?
18. Що таке температура інверсії та інверсійна крива реальних газів?
19. Покажіть за допомогою h,s -діаграми, як змінюється стан водяної пари при дроселюванні; чому дроселювання водяної пари супроводжується втратою наявної роботи?
20. Чи можна процес дроселювання зображати в термодинамічних діаграмах та як це зробити?

Приклади

Приклад 8.1. Якого діаметру повинна бути труба, щоб забезпечити витрату пари в кількості $\dot{m} = 3$ кг/с, якщо пара з параметрами $p = 0,8$ МПа та $t = 200$ °С рухається зі швидкістю 150 м/с?

Розв'язання. Масова витрата пари $\dot{m} = w f / v$. Звідси площа перерізу труби $f = v \dot{m} / w$, де v – питомий об'єм пари з параметрами p і t . Внутрішній діаметр труби $d = 2\sqrt{f / \pi}$. За таблицею «Вода та перегріта водяна пара» визначаємо: $v = 0,2609$ м³/кг. Тоді $f = 3 \cdot 0,2609 / 150 \approx 5,218 \cdot 10^{-3}$ м²; $d = 2\sqrt{5,218 \cdot 10^{-3} / \pi} \approx 8,15 \cdot 10^{-2}$ м.

Відповідь: $d = 82$ мм.

Приклад 8.2. Водяна пара, стан якої характеризують параметри $p = 0,12$ МПа, $t = 200$ °С, рухається зі швидкістю $w = 250$ м/с. Яку температуру покаже термометр, що знаходиться в цьому потоці пари?

Розв'язання. Температура на поверхні чутливого елемента термометра вища за температуру пари, що його оточує, за рахунок ефекту адіабатного гальмування. Ентальпія гальмування $h_o = h + w^2/2$, де h – ентальпія пари при параметрах p і t . Знаючи h_o та враховуючи, що $s = \text{const}$, за значеннями h_o та s можна визначити температуру, яку показує термометр.

За таблицею «Вода та перегріта водяна пара» визначаємо: $h = 2816$ кДж/кг; $s = 6,588$ кДж/(кг К). Розраховуємо $h_o = 2816 + 250^2 \cdot 10^{-3} / 2 =$

$= 2847 \text{ кДж/(кг К)}$. З цієї ж таблиці визначаємо, що температура пари з параметрами h_o та s приблизно становить 216°C . Очевидно, що вплив швидкості пари на показання термометра необхідно враховувати.

Відповідь: $t_T \approx 216^\circ\text{C}$.

Приклад 8.3. Для охолодження циліндрів стаціонарного двигуна їх обдувають потоком повітря, який витікає з системи сопел, що звужуються. Загальна площа вихідних перерізів сопел $f = 20 \text{ см}^2$. Тиск повітря перед соплами $p_1 = 0,176 \text{ МПа}$ і підтримується за допомогою повітродувки. Температура повітря перед соплами 60°C . Тиск навколишнього середовища $p_{\text{nc}} = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити теоретичну потужність повітродувки, яка забезпечує необхідну витрату повітря. Як зміняться результати розрахунку, якщо тиск повітря перед соплами буде $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$?

Розв'язання. Теоретична потужність повітродувки $N_0 = mw^2/2$, тому що ця кількість енергії має передаватися повітрю від повітродувки. Визначивши $\beta = p_{\text{nc}}/p_1$ та порівнявши його з $\beta_{\text{кр}} = (2/(k+1))^{k/(k-1)}$, вирішують, які формули використовувати для розрахунку швидкості та масової витрати газу. Розрахувавши m і w , розраховують N_0 . Послідовність розв'язання виглядає так.

Повітря – двоатомний газ, для якого $k = 1,4$. Критичне відношення тисків $\beta_{\text{кр}} = (2/(1,4+1))^{1,4/0,4} \approx 0,528$. Відношення тисків $\beta = 1/1,76 \approx 0,568$, тобто $\beta > \beta_{\text{кр}}$. Таким чином, розширення повітря в каналі сопла буде повним від p_1 до p_{nc} . Швидкість витікання менше критичної і її розраховують за формулою [1.1]:

$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 [1 - \beta^{(k-1)/k}]}$, де $R = R_{\mu}/\mu$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо:

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} 297 \cdot 333 [1 - 0,568^{(1,4-1)/1,4}]} \approx 321 \text{ м/с}.$$

Масову витрату повітря визначаємо із співвідношення [1.1]:

$$m = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} (\beta^{2/k} - \beta^{(k+1)/k})} \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}}.$$

Підставляючи числові значення величин, отримуємо:

$$m = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} (0,568^{2/1,4} - \beta^{(1,4+1)/1,4})} \frac{1,76 \cdot 10^5}{\sqrt{297 \cdot 333}} = 0,764 \text{ кг/с}.$$

Теоретична потужність повітродувки $N_0^* = 0,764 \cdot 321^2 \cdot 10^{-3}/2 \approx 39,4 \text{ кВт}$.

При $p_1' = 0,2$ МПа. відношення тисків $\beta = 0,5$, тобто $\beta < \beta_{кр}$. Розширення повітря в каналі сопла часткове від p_1' до $p_{кр}$. Швидкість витікання дорівнює критичній: $w_{кр} = \sqrt{(2k/k-1)RT_1}$, а масова витрата повітря [1.1]: $m = \frac{fp_1}{\sqrt{RT_1}} \times$

$\times \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}}$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо:

$$w_{кр} = \sqrt{2,8 \cdot 297 \cdot 333 / 2,4} \approx 340 \text{ м/с}; \quad m_{кр} = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{1,4(2/1,4)^{2,4/0,4}} \frac{2 \cdot 10^5}{\sqrt{297 \cdot 333}} = 0,871 \text{ кг/с}.$$

Теоретична потужність повітродувки $N_0' = 0,871 \cdot 340^2 \cdot 10^{-3} / 2 \approx 50,3$ кВт.

Відповідь: $N_0^* \approx 39,4$ кВт; $N_0' \approx 50,3$ кВт.

Приклад 8.4. Парова турбіна має два сопла. Площа вихідного перерізу кожного сопла $f = 2$ см². До сопел підводиться пара під тиском $p_1 = 10$ МПа та з температурою $t_1 = 500$ °С. В результаті адіабатного розширення пари її тиск падає до $p_2 = 6$ МПа. Визначити теоретичну потужність N_0 турбіни, нехтуючи тертям струменя в каналі сопла та початковою швидкістю пари. Як зміняться результати розрахунку, якщо адіабатне розширення відбудеться до $p_2' = 5$ МПа?

Розв'язання. Теоретична потужність турбіни $N_0 = ml_T = m(h_1 - h_2)$, де m – масова витрата пари; h_1, h_2 – ентальпія пари відповідно на вході та виході сопла. Масова витрата пари $m = 2fw/v_2$, де w – швидкість витікання пари; v_2 – питомий об'єм пари на виході з сопла. Щоб вибрати формулу для розрахунку w необхідно визначити відношення тисків $\beta = p_2/p_1$ та порівняти його з критичним $\beta_{кр} = 0,546$ (пара перегріта). Послідовність розв'язання виглядає так.

Відношення тисків $\beta = 6/10 = 0,6$, тобто $\beta > \beta_{кр}$. Тому розширення пари в каналі сопла повне від p_1 до p_2 . Масова витрата пари визначається за співвідношенням [1.1]: $m = 2f\sqrt{2(h_1 - h_2)}/v_2$, в якому різницю ентальпій $(h_1 - h_2)$ та питомий об'єм v_2 пари визначають по h,s -діаграмі. Для цього наносять точку 1 за значеннями $p_1 = 10$ МПа та $t_1 = 500$ °С; так як витікання адіабатне, то $s = \text{const}$, і для нанесення точки 2 необхідно опуститися з точки 1 вниз по лінії $s = \text{const}$ до перетину цієї лінії з ізобарою $p_2 = 6$ МПа. Значення $v_2 = 0,049$ м³/кг. Вимірявши довжину відрізка 1-2 та помноживши її на масштаб діаграми по вісі ординат $\mu_h = 4$ кДж/(кг мм), отримуємо: $h_1 - h_2 = 42 \cdot 4 = 168$ кДж/кг.

$m = 2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \sqrt{2000 \cdot 168} / 0,049 \approx 9,46$ кг/с. Теоретична потужність турбіни $N_0 = 9,46 \cdot 168 \approx 1590$ кВт.

При $p'_2 = 5$ МПа відношення тисків $\beta = 5/10 = 0,5$, тобто $\beta < \beta_{кр}$. В цьому випадку $m = 2f \sqrt{2(h_1 - h_{2кр})} / v_{2кр}$, де $h_{2кр}$ і $v_{2кр}$ – відповідно ентальпія та питомий об'єм пари при тиску $p_{2кр} = p_1 \beta_{кр}$ та $s_{кр} = s_1$; $v_{2кр} = 0,053$ м³/кг; $h_1 - h_{2кр} = 47 \cdot 4 = 188$ кДж/кг; $m = 2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \sqrt{2000 \cdot 188} / 0,053 \approx 9,25$ кг/с. Теоретична потужність турбіни $N_0^* = m(h_1 - h_{2кр}) = 9,25 \cdot 188 \approx 1739$ кВт.

Відповідь: $N_0 = 1590$ кВт; $N_0^* = 1739$ кВт.

Приклад 8.5. Визначити розміри надзвукового геометричного сопла Лаваля, через яке повинно витікати 7200 кг/год повітря, тиск якого на вході в сопло $p_1 = 0,7$ МПа і температура 27 °С. Витікання відбувається в середовищі, тиск якого $p_{нс} = 0,1$ МПа. Кут конусності частини сопла, яка розширюється, прийняти рівним 10°. Як зміняться швидкість та витрата повітря, якщо його температура на вході в сопло буде дорівнювати 177 °С? Як потрібно змінити розміри сопла, щоб витрата повітря не змінилася?

Розв'язання. Масову витрату повітря через горловину сопла можна розрахувати за формулою [1.1]:

$$m = f_{\min} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)} \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}}}. \quad (1)$$

Масову витрату повітря через устя сопла можна розрахувати за формулою [1.1]:

$$m = f_{\max} \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{ic}}{p_1} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_{i\bar{n}}}{p_1} \right)^{(k+1)/k} \right]}. \quad (2)$$

З наведених співвідношень легко визначити площі f_{\min} та f_{\max} , а отже і діаметри d_{\min} та d_{\max} . Довжина частини сопла, яка розширюється:

$$l = (d_{\max} - d_{\min}) / 2 \operatorname{tg}(\alpha/2). \quad (3)$$

Розв'язання виглядає так. Визначають площу горловини сопла за формулою (1):

$$f_{\min} = \frac{(7200/3600) \sqrt{287 \cdot 300}}{7 \cdot 10^5 \sqrt{1,4(2/2,4)^{2,4/0,4}}} \approx 1,224 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Визначають площу устя сопла з формули (2):

$$f_{max} = \frac{(7200/3600)\sqrt{287 \cdot 300}}{7 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \left[\left(\frac{1}{7}\right)^{2/1,4} - \left(\frac{1}{7}\right)^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right]}} \approx 1,948 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Визначають діаметр горловини сопла $d_{min} = \sqrt{4f_{min}/\pi}$ та устя сопла $d_{max} = \sqrt{4f_{max}/\pi}$. Підставляючи числові значення величин, отримуємо:
 $d_{min} = \sqrt{1,224 \cdot 10^{-3}/0,785} \approx 3,95 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad d_{max} = \sqrt{1,948 \cdot 10^{-3}/0,785} \approx 4,98 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$

Визначають довжину частини сопла, яка розширюється, за формулою (3):

$$l = (4,98 - 3,95) \cdot 10^{-2} / 2 \operatorname{tg} 5^\circ \approx 5,89 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Швидкість витікання з сопла Лавалю розраховують за формулою:

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_{i\bar{n}}}{\bar{\sigma}_1} \right)^{(k-1)/k} \right]}. \quad (4)$$

$$\text{Отже, при } t_1 = 27^\circ \text{C} \quad w = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} 287 \cdot 300 \left[1 - \left(\frac{1}{7} \right)^{(1,4-1)/1,4} \right]} \approx 507 \text{ м/с};$$

$$\text{При } t'_1 = 177^\circ \text{C} \quad w = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} 287 \cdot 450 \left[1 - \left(\frac{1}{7} \right)^{(1,4-1)/1,4} \right]} \approx 621 \text{ м/с}.$$

В формулах (1) та (2) T_1 стоїть в знаменнику. Отже, із зростанням T_1 витрата зменшується та при незмінних розмірах сопла буде дорівнювати:

$$m = 1,224 \cdot 10^{-3} \cdot 0,685 \cdot (7 \cdot 10^5 \cdot 3600 / \sqrt{287 \cdot 450}) \approx 5850 \text{ кг/год}.$$

Щоб зберегти витрату постійною, розміри сопла повинні бути наступними:

$$\begin{aligned} f_{min}^* &= f_{min} \sqrt{T'_1/T_1}; \quad f_{max}^* = f_{max} \sqrt{T'_1/T_1}. \quad f_{min}^* = 1,224 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{450/300} \approx \\ &\approx 1,499 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \quad f_{max}^* = 1,948 \cdot 10^{-3} \sqrt{450/300} \approx 2,386 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \\ d_{min}^* &= \sqrt{1,499 \cdot 10^{-3}/0,785} \approx 4,37 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad d_{max}^* = \sqrt{2,386 \cdot 10^{-3}/0,785} \approx \\ &\approx 5,51 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad l^* = (5,51 - 4,37) 10^{-2} / 2 \operatorname{tg} 5^\circ \approx 6,52 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \end{aligned}$$

$$\text{Відповідь:} \quad d_{min} = 3,95 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad d_{max} = 4,98 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad l = 5,89 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ d_{min}^* = 4,37 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad d_{max}^* = 5,51 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad l^* = 6,52 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Приклад 8.6. Перегріта водяна пара з параметрами $p_1 = 1 \text{ МПа}$ і $t_1 = 400^\circ \text{C}$ поступає на вхід надзвукового геометричного сопла Лавалю та розширюється адіабатно в каналі сопла до тиску $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Масова витрата пари $m = 5 \text{ кг/с}$. Визначити розміри сопла, якщо кут конусності частини сопла, яка розширюється, $\alpha = 12^\circ$. Швидкістю пари на вході в сопло знехтувати.

Розв'язання. В горловині сопла буде досягнута критична швидкість витікання. Масова витрата пари через горловину сопла:

$$m = f_{min} \sqrt{2(h_1 - h_{2кр})} / v_{2кр}, \quad (1)$$

де $v_{2кр}$ та $h_{2кр}$ — відповідно питомий об'єм та ентальпія пари в критичному стані при $p_{2кр}$ та $s_{кр} = s_1$. Масова витрата через устя сопла:

$$m = f_{max} \sqrt{2(h_1 - h_2)} / v_2, \quad (2)$$

де v_2 і h_2 — відповідно питомий об'єм та ентальпія пари при p_2 та $s_2 = s_1$. З наведених співвідношень легко визначаються площі f_{min} та f_{max} , а відповідно, і діаметри горловини та устя сопла d_{min} і d_{max} . Довжину частини сопла, яка розширюється, визначають за співвідношенням:

$$l = (d_{max} - d_{min}) / 2 \operatorname{tg}(\alpha/2).$$

Таким чином, розв'язання зводиться до визначення параметрів пари v_2 , $v_{2кр}$, h_1 , h_2 , $h_{2кр}$ і s_1 . Задачу зручно розв'язувати за допомогою h,s -діаграми (див. приклад 8.4). Розв'язання виглядає наступним чином.

Для перегрітої пари $\beta_{кр} = 0,546$. Критичний тиск $p_{кр} = p_1 \beta_{кр}$; $p_{2кр} = 1 \cdot 0,546 = 0,546$ МПа.

За значеннями $p_1 = 1$ МПа і $t_1 = 400$ °С наносять на діаграму точку 1; так як витікання адіабатне, то $s = \text{const}$ і для визначення v_2 і $v_{2кр}$ з точки 1 опускаються вниз по лінії $s = \text{const}$ до перетину її з ізобарою $p_{2кр} = 0,546$ МПа в точці 2' і з ізобарою $p_2 = 0,1$ МПа в точці 2. Визначають в цих точках значення питомих об'ємів: $v_{2кр} = 0,50$ м³/кг; $v_2 = 1,8$ м³/кг. Вимірюють довжини відрізків 1-2' і 1-2 та, помноживши їх на масштаб діаграми для вісі ординат $\mu_h = 4$ кДж/(кг мм), отримують: $h_1 - h_{2кр} = 43 \cdot 4 = 172$ кДж/кг; $h_1 - h_2 = 136 \cdot 4 = 544$ кДж/кг.

Визначають площі перетину горловини та устя сопла:

$$f_{min} = 5 \cdot 0,50 / \sqrt{200 \cdot 172} \approx 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$f_{max} = 5 \cdot 1,80 / \sqrt{2000 \cdot 544} \approx 8,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Визначають діаметри горловини та гирла сопла: $d_{min} = \sqrt{42,6 \cdot 10^{-4} / 0,785} \approx 7,37 \cdot 10^{-2}$ м; $d_{max} = \sqrt{86,3 \cdot 10^{-4} / 0,785} \approx 10,48 \cdot 10^{-2}$ м. Знаходять довжину частини сопла, яка розширюється: $l = (10,48 - 7,37) \cdot 10^{-2} / 2 \operatorname{tg}(6^\circ) = 14,8 \cdot 10^{-2}$ м.

Відповідь: $d_{min} = 74$ мм; $d_{max} = 105$ мм; $l = 150$ мм.

Приклад 8.7. Перегріта пара з параметрами $p_1 = 5$ МПа і $t_1 = 400$ °С дроселюється в регулюючому клапані парової турбіни до $p_2 = 4$ МПа, а потім адіабатно розширюється в соплах турбіни до $p_3 = 0,5$ МПа. Визначити втрату

корисної роботи турбіни внаслідок дроселювання, якщо витрата пари $D = 10$ кг/с. Зобразити в h,s -координатах процеси дроселювання в клапані та розширення пари в соплах турбіни.

Розв'язання. Згідно з Першим законом термодинаміки $Q = \Delta H + L_T$. Так як пара розширюється адіабатно, то $L_{T_0} = -\Delta H_0 = D(h_1 - h_3)$, де h_1, h_3 – ентальпія пари при її параметрах $p_1 = 5$ МПа, $t_1 = 400^\circ\text{C}$ і $p_3 = 0,5$ МПа та $s_3 = s_1$. В результаті дроселювання стан пари зміниться і буде характеризуватися параметрами $p_2 = 4$ МПа і $h_1 = h_2$. Робота розширення пари в турбіні в цьому випадку $L_{T_\partial} = -\Delta H_\partial = D(h_2 - h_4)$, де h_4 – ентальпія пари при параметрах $p_3 = 0,5$ МПа, $s_4 = s_2$. Втрата корисної роботи внаслідок дроселювання $\Delta L_T = L_{T_0} - L_{T_\partial} = D(h_4 - h_3)$. Таким чином, розв'язання зводиться до знаходження різниці ентальпій $h_4 - h_3$, що зручно зробити за допомогою h,s -діаграми.

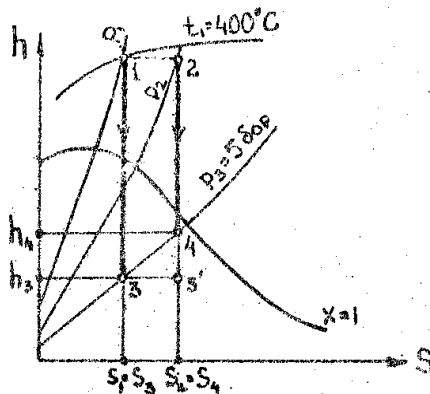


Рис.8.1. До прикладу 8.7. точки проводять горизонталь до перетину її з ізобарою $p_2 = 4$ МПа в точці 2 та вертикаль $s_1 = s_3$ вниз до перетину її з ізобарою $p_3 = 0,5$ МПа в точці 3. З точки 2 проводять вертикаль $s_2 = s_4$ вниз до перетину її з ізобарою $p_3 = 0,5$ МПа в точці 4. З точки 3 проводять горизонталь до перетину її з вертикаллю 2-4 в точці 3'. Вимірюють довжину відрізка 4-3' та, помноживши її на масштаб діаграми по вісі ентальпій $\mu_h = 4$ кДж/(кг мм), знаходять значення різниці $(h_4 - h_3) = 10,5 \cdot 4 = 42$ кДж/кг. Втрата корисної роботи $\Delta L_T = 10 \cdot 42 = 420$ кВт.

Відповідь: $\Delta L_T = 420$ кВт.

Приклад 8.8. Розрахувати секундну масову витрату окису вуглецю CO та швидкість витікання її з сопла, що звужується, якщо параметри газу на вході сопла $p_1 = 0,5$ МПа і $t_1 = 680^\circ\text{C}$. Тиск середовища, в яке витікає газ $p_c = 0,3$ МПа. Площа вихідного отвору сопла $f = 1$ см². Коефіцієнт швидкості $\phi = 1$. Яка швидкість звуку в газі у вихідному отворі сопла. При розрахунку використати таблицю термодинамічних функцій газу та врахувати залежність ентальпії від температури.

Розв'язання. Для визначення режиму витікання газу з сопла розраховуємо відношення тисків $p_1/p_c = \beta = 0,3/0,5 = 0,6$. Критичне відношення тисків $\beta_{кр} = 0,528$. Отже, $\beta > \beta_{кр}$ і в каналі сопла газ розширюється повністю від тис-

ку p_1 до p_c , його питома ентальпія змінюється від h_1 до h_c . Масова витрата газу $m = w_2 f v_2$, кг/с, де w_2 – швидкість витікання газу з сопла, $w_2 = 44,72 \sqrt{h_1 - h_2}$.

Швидкість звуку в газі у вихідному отворі сопла $\dot{a}_2^* = \sqrt{\tilde{k} p_c v_2}$, де \tilde{k} – середнє значення показника адіабати. $\tilde{k} = (h_1 - h_c) / (u_1 - u_c)$, де u_1 і u_c – значення внутрішньої енергії газу. Отже, розв'язування зводиться до визначення величин h_1 , h_c , v_2 та \tilde{k} .

За відомою температурою $t_1 = 680^\circ\text{C}$ ($T_1 = 953\text{ K}$) з таблиці 19 [3.3] знаходимо: $h_1 = 1028,7$ кДж/кг; $u_1 = 745,8$ кДж/кг; $\pi_{00} = 151,68$; $\theta_{00} = 190,24$.

Для визначення кінцевих параметрів газу необхідно знати температуру t_2 . Відомо [1.4], що $p_c/p_1 = \pi_{02}/\pi_{00}$, звідки $\pi_{02} = \pi_{00} p_c/p_1$. Тоді $\pi_{02} = 151,68 \cdot 0,6 \approx 91$. За цим значенням π_{02} визначаємо з [3.3]: $t_2 \approx 563^\circ\text{C}$ (836 K), $u_c \approx 644,8$ кДж/кг; $h_c \approx 893$ кДж/кг; $\theta_{02} \approx 278,37$.

Питомий об'єм $v_2 = v_1 \theta_{02} / \theta_{00} = (RT_1/p_1) \theta_{02} / \theta_{00}$ звідки $v_2 = (R_\mu T_1 / \mu p_1) \theta_{02} / \theta_{00}$. Підставляючи значення, отримуємо: $v_2 = 8314 \cdot 953 \cdot 278,37 / 28 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 190,24 \approx 0,828\text{ м}^3/\text{кг}$ газу.

Середнє значення показника адіабати $\tilde{k} = (h_1 - h_c) / (u_1 - u_c)$, звідки $\tilde{k} = (1028,7 - 893) / (745,8 - 644,8) \approx 1,343$.

Швидкість витікання $w_2 = 44,72 \sqrt{1028,7 - 893} \approx 520,9$ м/с; витрата газу через сопло $m = (520,9 \cdot 10^{-4} / 0,828) \approx 0,0629$ кг/с або 226,44 кг/год. Швидкість звуку в газі $\dot{a}_2^* = \sqrt{1,343 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 0,828} \approx 577,6$ м/с.

Відповідь: $w_2 \approx 521$ м/с; $m \approx 0,0629$ кг/с; $\dot{a}_2^* \approx 577,6$ м/с.

Задачі

Задача 8.1. Водяна пара тече в трубі з внутрішнім діаметром 50 мм. Швидкість пари 200 м/с, тиск 7 МПа, температура 300°C . Визначити витрату пари.

Відповідь: $m = 60$ т/год.

Задача 8.2. Яку температуру покаже термометр, який поміщено в потік повітря з температурою 200°C і швидкістю 200 м/с? Теплоємність повітря $c_p = 1$ кДж/(кг К) вважати постійною.

Відповідь: $t = 220^\circ\text{C}$.

Задача 8.3. Швидкість адіабатного газового потоку змінюється від 500 м/с до 200 м/с, а потужність, що відводиться від потоку, $N = 360$ кВт при масовій витраті газу $m = 0,5$ кг/с. Розрахувати зміну питомої ентальпії газу.

Відповідь: $\Delta h = -615$ кДж/кг, тобто ентальпія газу зменшилася.

Задача 8.4. В ресивері компресора підтримується тиск $p_1 = 0,5$ МПа. Повітря з ресивера витікає через трубку з внутрішнім діаметром 10 мм в середовище з тиском $p_2 = 0,3$ МПа. Температура повітря в ресивері 17 °С. Вважаючи витікання адіабатним, визначити швидкість витікання та витрату повітря. Як зміняться результати розрахунку, якщо витікання буде відбуватися в атмосферу при барометричному тиску $B = 0,1$ МПа.

Відповідь: $w = 281$ м/с; $m = 0,092$ кг/с; $w_{кр} = 312$ м/с; $m_{кр} = 0,093$ кг/с.

Задача 8.5. Водяна пара з параметрами $p_1 = 1,4$ МПа і $t_1 = 400$ °С витікає в атмосферу з барометричним тиском $B = 0,1$ МПа через коротку циліндричну насадку діаметром 20 мм. Визначити швидкість витікання та масову витрату пари. Як зміняться результати розрахунку, якщо витікання буде відбуватися в середовище з тиском $p_2 = 0,85$ МПа?

Відповідь: $w = 529$ м/с; $m = 0,511$ кг/с; $w_{кр} = 583$ м/с; $m_{кр} = 0,523$ кг/с.

Задача 8.6. Визначити швидкість витікання водяної пари через циліндричний отвір в паропроводі котла в атмосферу, якщо тиск пари $p_1 = 1$ МПа і $t_1 = 390$ °С. $\beta_{кр} \approx 0,546$ для перегрітої пари.

Відповідь: $w = 585$ м/с.

Задача 8.7. Визначити швидкість витікання водяної пари з сопла, що звужується, якщо параметри пари $p_1 = 0,8$ МПа і $t_1 = 350$ °С, а тиск в навколишньому середовищі $p_2 = 0,6$ МПа.

Відповідь: $w = 412$ м/с.

Задача 8.8. Водяна пара на вході комбінованого сопла має тиск $p_1 = 3$ МПа і температуру $t_1 = 600$ °С. Пара витікає в середовище, тиск в якому $p_2 = 0,5$ МПа. Визначити швидкість витікання пари. $\beta_{кр} \approx 0,546$ для перегрітої пари.

Відповідь: $w = 1086$ м/с.

Задача 8.9. Водяна пара має температуру $t_1 = 350$ °С при тиску $p_1 = 2,0$ МПа і витікає в навколишнє середовище, тиск якого $p_2 = 0,1$ МПа. Розрахувати швидкість адіабатного витікання пари через сопло, що звужується (просте сопло) і через комбіноване сопло.

Відповідь: $w = w_{кр} = 564$ м/с; $w = 1100$ м/с.

Задача 8.10. Водяна пара на вході ідеального сопла Лавалля має тиск 3,5 МПа і температуру 400 °С. Пара витікає адіабатно (ізоентропно) в середовище, тиск в якому 0,005 МПа. Розрахувати швидкість витікання.

Відповідь: $w = 1570 \pm 70$ м/с.

Задача 8.11. Кисень має температуру $t_1 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ при тиску $p_1 = 1,8\text{ МПа}$ і витікає в середовище, тиск в якому: а) $1,2\text{ МПа}$; б) $0,7\text{ МПа}$. Якого типу сопло слід використати у випадках а) і б), аби використати повністю різницю тисків при витіканні газу? Розрахувати теоретичну та дійсну швидкість витікання, якщо швидкісний коефіцієнт сопла $\varphi = 0,9$ в обох випадках.

Відповідь: а) сопло, що звужується; $w_d \approx 245\text{ м/с}$; $w_T \approx 272,4\text{ м/с}$; б) комбіноване сопло; $w_d \approx 400\text{ м/с}$; $w_T \approx 360\text{ м/с}$.

Задача 8.12. Водяна пара з параметрами $p_1 = 10,0\text{ МПа}$ та $x_1 = 1$ дроселюється до тиску $p_2 = 0,1\text{ МПа}$. Використовуючи h,s -діаграму, визначити, на скільки зменшиться температура пари?

Відповідь: зменшиться на $171\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 8.13. Кисень з параметрами на вході в сопло Лавалю $p_1 = 1\text{ МПа}$ і $t_1 = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ витікає в середовище з тиском $p_2 = 0,1\text{ МПа}$. Визначити швидкість витікання і витрату кисню, якщо діаметр горловини сопла $d_{\min} = 5\text{ мм}$, а діаметр устя сопла $d_{\max} = 8\text{ мм}$. Швидкість газу перед соплом дорівнює нулю. Яка температура кисню на виході з сопла?

Відповідь: $w = 583\text{ м/с}$; $m = 0,0348\text{ кг/с}$; $t_2 = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 8.14. Для очищення поверхні нагріву парогенераторів застосовують обдувальні апарати, з сопел яких пара витікає з великою швидкістю та здуває забруднення з поверхні нагріву. Визначити розміри надзвукового геометричного сопла такого апарату, якщо на вхід до сопла поступає суха насичена пара, тиск якої $p_1 = 2,1\text{ МПа}$. Витрата пари 1 т/год . Тиск пари на виході з сопла $p_2 = 0,1\text{ МПа}$. Яка швидкість пари на виході з сопла?

Відповідь: $w = 1000\text{ м/с}$; $d_{\min} = 11,2\text{ мм}$; $d_{\max} = 22,4\text{ мм}$.

Задача 8.15. Вологу насичену пару характеризують параметри до дроселювання: а) тиск $p_1 = 0,5\text{ МПа}$ і ступінь (міра) сухості $x_1 = 0,95$; б) тиск $p_1 = 3\text{ МПа}$ і ступінь (міра) сухості $x_1 = 0,91$. Ця пара дроселюється до тиску: а) $p_2 = 0,2\text{ МПа}$; б) $p_2 = 0,5\text{ МПа}$. Розрахувати: вологість і температуру пари після дроселювання; значення інтегрального дросельного ефекту.

Відповідь: а) $x_2 = 0,97$; $t_2 = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_h = 105\text{ К/МПа}$; б) $x_2 = 0,95$; $t_2 = 152\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_h = 32,84\text{ К/МПа}$.

Задача 8.16. Волога водяна пара під тиском $p_1 = 2\text{ МПа}$ спрямовується в дросельний калориметр для визначення ступеня (міри) сухості пари. В калориметрі пара дроселюється до тиску $p_2 = 0,1\text{ МПа}$; температура пари при

цьому знижується до 110 °С. Чому дорівнює ступінь (міра) сухості вихідної пари? На скільки зросла ентропія пари при дроселюванні?

Відповідь: $x = 0,946$; $\Delta s = 1,3$ кДж/(кг К).

Задача 8.17. Волога пара з температурою $t_1 = 180$ °С дроселюється до стану сухої насиченої пари з температурою $t_2 = 150$ °С. Потім пара розширюється в турбіні до тиску в конденсаторі $p_3 = 0,004$ МПа. Визначити параметри пари до та після дроселювання та втрату наявної роботи внаслідок дроселювання.

Відповідь: $p_1 = 1$ МПа; $x_1 = 0,985$; $h_1 = h_2 = 2746$ кДж/кг; $p_2 = 0,48$ МПа; $\Delta L_T = 96$ кДж/кг.

Задача 8.18. Визначити до якого тиску потрібно дроселювати водяну пару, яка має початковий тиск $p_1 = 1$ МПа і ступінь сухості $x_1 = 0,95$, аби вона стала сухою насиченою? Як зміняться питомі внутрішня енергія та ентропія пари в процесі дроселювання?

Відповідь: $p_2 = 0,1$ МПа; $\Delta u = -14$ кДж/кг; $\Delta s = 1$ кДж/(кг К).

Задача 8.19. Водяна пара з початковими параметрами $p_1 = 5$ МПа і $t_1 = 360$ °С дроселюється до тиску $p_2 = 1,5$ МПа. Визначити стан і параметри пари до та після дроселювання, а також зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії пари в процесі дроселювання.

Відповідь: 1) перегріта пара; $h_1 \approx h_2 \approx 3100$ кДж/кг; 2) перегріта пара; $\Delta u = -2$ кДж/кг; $\Delta s = 0,53$ кДж/(кг К).

Задача 8.20. Визначити, яку температуру покаже термометр, що розміщений в потоці водяної пари, який рухається з швидкістю 300 м/с, якщо параметри пари $p_1 = 3$ МПа і $t_1 = 450$ °С. Як зміняться покази термометра, якщо це буде потік повітря?

Відповідь: $t_{\pi} = 470$ °С; $t_{\text{пов}} = 495$ °С.

Задача 8.21. Водяна пара тече в трубопроводі з внутрішнім діаметром 50 мм. Параметри пари: $p_1 = 1,6$ МПа і $t_1 = 300$ °С; швидкість течії 50 м/с. Визначити масову витрату пари, вважаючи пару: а) ідеальним газом; б) реальним газом та використовуючи таблиці термодинамічних властивостей пари.

Відповідь: $m_T = 0,393$ кг/с; $m_{\pi} = 0,613$ кг/с.

Задача 8.22. Газ з параметрами p_1 і $t_1 = 200$ °С витікає з сопла, що звузиться, в середовище, тиск в якому $p_{\text{нс}}$. Діаметр устя сопла $d = 10$ мм. Витікання адіабатне, швидкість газу перед соплом дорівнює нулю. Для свого но-

меру варіанта завдання розрахувати швидкість витікання, параметри газу та його масову витрату на виході з сопла. Обмінятися даними з студентами своєї групи та побудувати графіки залежності $w = w(\beta)$, $m = m(\beta)$. Вихідні дані для розрахунку вибрати з табл.П.2.15 додатків.

Задача 8.23. Водяна пара витікає з сопла, що звужується, діаметр устя якого 20 мм. Визначити швидкість витікання та масову витрату пари. Вихідні дані для розрахунку взяти з табл.П.2.16 додатків. Швидкість пари перед соплом дорівнює нулю. Зобразіть процес схематично в h,s -координатах.

Задача 8.24. Розрахувати швидкість та масову витрату водяної пари, що витікає з надзвукового геометричного сопла Лавалю, якщо параметри пари на вході в сопло p_1 і t_1 , тиск пари на виході з сопла p_2 , діаметр горловини сопла d_{\min} , діаметр устя сопла d_{\max} . Швидкість пари на вході в сопло дорівнює нулю. Вихідні дані для розрахунку вибрати з табл.П.2.17 додатків. Розрахунок виконати, вважаючи пару: а) ідеальним газом з постійною теплоємністю; б) реальним газом, використовуючи h,s -діаграму.

Задача 8.25. Водяна пара охолоджується ізобарно до стану вологої насиченої, в якому має ступінь сухості $x_2 = 0,85$ і ентальпію $h_2 = 2400$ кДж/кг. Потім пара дроселюється і її ступінь сухості досягає $x_3 = 0,925$. Далі пара підігрівається ізобарно до стану сухої насиченої і стискується адіабатно до початкового стану перед охолодженням. Визначити початкові тиск і температуру пари.

Відповідь: $p_1 = 0,3$ МПа; $t_1 = 450$ °С.

2.9. ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ СТАНУ РОБОЧИХ ТІЛ (РОЗРАХУНКОВА РОБОТА)

Мета – закріпити знання відповідного теоретичного матеріалу дисципліни та сформувати вміння термодинамічного аналізу процесів зміни станів робочих тіл.

Зміст і обсяг базових знань по темі

Приступаючи до виконання розрахункової роботи необхідно: знати теоретичний матеріал, який стосується параграфів 2.1, 2.2, 2.5, 2.6 цього посібника та застосовується при виконанні розрахункової роботи; вміти провести

термодинамічний аналіз запропонованого варіанту процесу зміни стану робочого тіла відповідно до умов завдання.

Умови завдання

Робоче тіло – речовина H_2O знаходиться в початковому стані під тиском p_1 , МПа і має температура t_1 , °С. Здійснюючи визначений варіантом завдання термодинамічний процес при сталому значенні параметра $z_1 = \text{const}$, робоче тіло в кінцевому стані досягає певного значення параметра z_3 .

Вважаючи робоче тіло: а) ідеальним газом з постійною теплоємністю; б) ідеальним газом, теплоємність якого залежить від температури, та використовуючи термодинамічні функції за С.Л.Рівкіним; в) реальним газом, і використовуючи лише таблиці термодинамічних властивостей води та водяної пари; г) реальним газом, і використовуючи термодинамічні діаграми, визначити або розрахувати для цього робочого тіла:

- початкові та кінцеві значення термічних і калоричних параметрів його в процесі;
- питому теплоємність процесу;
- зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії;
- характеристики процесу – кількість теплоти та роботи процесу.

Зобразити процес, що аналізується, в p,v ; T,s ; h,s -координатах та його схему енергобалансу.

Порівняти числові значення споріднених величин, визначених або розрахованих за пунктами а), б), в), г), та пояснити причини розбіжності цих значень, виходячи з різниці властивостей ідеальних і реальних газів.

Надати висновки щодо умов практичної придатності результатів розрахунків за пунктами а), б), в), г).

Вихідні дані для розрахунків наведені в таблиці П2.18 додатків.

Рекомендована література:[1.1], [1.2], [1.4], [2.1], [2.4], [2.6]

Рекомендації до виконання роботи

Виконувати розділи роботи необхідно послідовно, одразу після отримання завдання та графіка його виконання. Кожен студент має мати зошит-чернетку для розрахунків, з якого після затвердження викладачем результатів розрахунків певного розділу роботи роздрукувати чистовий примірник. Вимоги до оформлення цього примірника роботи оголошує викладач.

Розділи роботи виконуються студентом самостійно та послідовно після опрацювання матеріалу відповідної теми дисципліни на практичних заняттях.

Викладач перевіряє та затверджує результати розрахунків в присутності студента на планових консультаціях. Дотримання графіка виконання роботи враховується при визначенні поточної успішності студента з дисципліни.

Розрахунки виконують для двох випадків. В першому випадку робоче тіло – речовину H_2O вважають ідеальним газом, в другому – реальним газом. При виконанні розрахунків процесів ідеального газу H_2O зі сталою теплоємністю ($c = \text{const}$) основою слугують рівняння стану ідеального газу та рівняння першого та другого законів термодинаміки, записані в відповідних формах. Якщо при розрахунках зміни станів ідеального газу H_2O треба враховувати залежність його теплоємності від температури газу, слід використовувати таблиці значень середніх в інтервалі температур процесу теплоємностей та оцінювати розбіжність отриманих результатів з результатами розрахунків при сталому значенні теплоємності. Розраховувати калоричні параметри стану можна за формулами: $u = c_v \Big|_0^t$; $h = c_p \Big|_0^t$; та $s = s^0 + R \ln(p/p_i)$, де значення p_n відносять до нормальних умов.

При розрахунках зміни стану робочого тіла в адіабатних процесах, в яких показник адіабати процесу залежить від температури, слід використовувати співвідношення, отримані С.Л.Рівкіним: $p_1/p_2 = \pi_{01}/\pi_{02}$; $v_1/v_2 = \theta_{01}/\theta_{02}$. Нехтування цією залежністю може призвести до значних помилок. Значення величин u , h , s^0 , π_0 , θ_0 приймають за таблицями С.Л.Рівкіна [3.3] і [3.4].

Розрахунки процесів з реальною водяною парою виконують з використанням окремо таблиць та окремо ентальпійних діаграм (T,s ; h,s) властивостей пари незалежно один від одного. Спочатку використовують таблиці та необхідні формули, а потім – «читання» діаграм, на яких побудовані процеси, що їх розраховують. На пояснювальних рисунках в тексті роботи при використанні діаграм обов'язково треба позначати пограничні та ізопараметричні криві.

Зміну в процесі внутрішньої енергії пари треба розраховувати за однакою для всіх типів процесів і термодинамічних станів пари формулою: $\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1)$, оскільки у всіх цих випадках $u = h - p v$.

Питомі кількості теплоти та роботи процесу в залежності від його типу розраховують так: питома кількість роботи $l = q - \Delta u$ для всіх процесів; питома кількість теплоти процесу $q_v = u_2 - u_1$ в ізохоричному процесі; $q_p = h_2 - h_1$ в ізобарному процесі; $q_T = T(s_2 - s_1)$ в ізотермічному процесі. У випадках, коли $c_v = \text{const}$ і $c_p = \text{const}$, $q_v = c_v(t_2 - t_1)$, $q_p = c_p(t_2 - t_1)$. У випадку рівноважного ізотермічного процесу ідеального газу $q_T = RT_1 \ln(v_2/v_1) = -RT_1 \ln(p_2/p_1)$.

Послідовність виконання роботи має бути такою:

- розрахунок (визначення) параметрів вихідного стану робочого тіла;

- розрахунок (визначення) параметрів кінцевого (після здійснення процесу) стану робочого тіла; значення жодної з визначених або розрахованих величин не повинні бути перенесеними з одного пункту розрахунку до іншого;
- при розрахунках зміни параметрів стану в процесі та характеристик процесу (кількості теплоти та роботи процесу) особливу увагу слід звертати на різні закономірності зміни значень величин в залежності від стану пари (насичена або перегріта);
- зображення процесів, що розраховуються, в p,v ; T,s ; h,s -координатах треба виконувати, враховуючи стан пари та тип процесу;
- зображення схеми енергобалансу процесу та тлумачення її з поясненням взаємозв'язку між витратами теплоти, роботи, зміною внутрішньої енергії робочого тіла.

В кінці роботи подають висновки.

Приклад виконання роботи.

Вихідні дані

Водяна пара має об'єм $V = 2,5 \text{ м}^3$ при тиску $p_1 = 10 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 440 \text{ }^\circ\text{C}$. Пара здійснює ізоентропійний (адіабатний) процес, в кінці якого її тиск зменшується до $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$. Розрахувати (визначити) всі початкові та кінцеві термічні та калоричні параметри пари, а також кількості роботи та теплоти цього процесу, вважаючи речовину H_2O : ідеальним газом і теплоємність процесу сталою $c = \text{const}$; ідеальним газом і теплоємність процесу залежною від температури $c = c(T)$; реальною парою та використовуючи таблиці термодинамічних властивостей водяної пари; реальною парою та використовуючи ентропійні діаграми водяної пари.

Зобразити: процес зміни стану пари в p,v ; T,s ; h,s -координатах та схему енергобалансу процесу. Надати тлумачення схеми енергобалансу.

А: Речовина H_2O – ідеальний газ

а) теплоємність процесу стала величина (за молекулярно-кінетичною теорією).

Питомий об'єм газу обчислюємо з термічного рівняння стану ідеального газу $p_1 v_1 = RT_1$, де питома газова стала $R = R_\mu / \mu = 8,314 / 18 = 0,462 \text{ кДж} / (\text{кг К})$. Маса водяної пари, що бере участь у процесі $m = V_1 / v_1$, де $v_1 = RT_1 / p_1$. $v_1 = 462 \cdot 713 / 10^7 \approx 0,033 \text{ м}^3 / \text{кг}$. $m = 2,5 / 0,03 = 75,76 \text{ кг}$.

З таблиць молярних теплоємностей, отриманих на основі молекулярно-кінетичної теорії, для водяної пари, як трьохатомного ідеального газу, знаходимо [3.1]: молярна ізобарна теплоємність $c_{\mu p} = 9R_{\mu}/2 = 9 \cdot 8,314/2 = 37,413 \text{ кДж}/(\text{кмоль К})$; молярна ізохорна теплоємність $c_{\mu v} = 7R_{\mu}/2 = 7 \cdot 8,314/2 = 29,099 \text{ кДж}/(\text{кмоль К})$.

Питомі теплоємності обчислюємо за формулами: питома ізобарна теплоємність $c_p = c_{\mu p}/\mu = 37,413/18 = 2,0785 \text{ кДж}/(\text{кг К})$; питома ізохорна теплоємність $c_v = c_{\mu v}/\mu = 29,099/18 = 1,6166 \text{ кДж}/(\text{кг К})$.

Питома ентальпія: $h_1 = c_p t_1 = 2,0785 \cdot 440 = 914,54 \text{ кДж/кг}$, при початку відліку від 0°C ; $h_1 = c_p T_1 = 2,0785 \cdot 713 \approx 1482 \text{ кДж/кг}$, при початку відліку від 0 К . Питома внутрішня енергія: $u_1 = c_v t_1 = 1,6166 \cdot 440 = 711,3 \text{ кДж/кг}$, при початку відліку від 0°C ; $u_1 = c_v T_1 = 1,6166 \cdot 713 = 1152,6 \text{ кДж/кг}$, при початку відліку від 0 К . Питома ентропія $s_1 = c_p \ln(T_1/T_0) - R \ln(p_1/p_0) = 2,0785 \ln(713/273) - 0,4619 \ln(10^7/10^5) = -0,132 \text{ кДж}/(\text{кг К}) < 0$, при початку відліку від $T_0 = 273 \text{ К}$, $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Визначаємо параметри газу в кінцевому стані, в якому відомий лише тиск газу $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$. Другий термічний параметр – питома об'єм v_2 визначаємо з рівняння $v_2/v_1 = (p_1/p_2)^{1/k}$, яке випливає з рівняння ізоентропного процесу $p v^k = \text{const}$. Показник ізоентропи (адіабати) для триатомного ідеального газу $k = c_p/c_v = 9/7 = 1,2857$. Тоді $v_2 = v_1 (p_1/p_2)^{1/k}$, звідки $v_2 = 0,033(10^7/3 \cdot 10^5)^{1/1,2857} = 0,5031 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Третій термічний параметр – термодинамічну температуру – обчислюємо з термічного рівняння стану ідеального газу $p_2 v_2 = R T_2$, звідки $T_2 = p_2 v_2 / R = 3 \cdot 10^5 \cdot 0,5031 / 461,9 = 326,75 \text{ К}$, ($t_2 = 53,75^\circ\text{C}$).

Визначаємо калоричні параметри газу. Питома ентальпія газу при початку відліку від 0°C дорівнює: $h_2 = c_p t_2 = 2,0785 \cdot 53,75 = 111,7 \text{ кДж/кг}$; при початку відліку від 0 К – $h_2 = c_p T_2 = 2,0785 \cdot 326,75 = 679,15 \text{ кДж/кг}$. Питома внутрішня енергія газу при початку відліку від 0°C дорівнює: $u_2 = c_v t_2 = 1,6166 \cdot 53,75 = 86,9 \text{ кДж/кг}$, при початку відліку від 0 К – $u_2 = c_v T_2 = 1,6166 \cdot 326,75 = 528,2 \text{ кДж/кг}$. Питома ентропія газу в цьому процесі – стала величина, яка при початку відліку від $T_0 = 273 \text{ К}$, $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ дорівнює: $s_2 = c_p \ln(T_2/T_0) - R \ln(p_2/p_0) = 2,0785 \ln(326,75/273) - 0,462 \ln(3 \cdot 10^5/10^5) = -0,132 \text{ кДж}/(\text{кг К}) < 0$, тобто від'ємна величина.

Обчислюємо зміни калоричних параметрів у процесі. Зміна питомої ентальпії $\Delta h = c_p(t_2 - t_1) = 2,0785(53,75 - 440) = -802,8$ кДж/кг, при початку відліку від 0 °С; $\Delta h = c_p(T_2 - T_1) = 2,0785(326,75 - 713) = -802,8$ кДж/кг, при початку відліку від 0 К. Зміна питомої внутрішньої енергії $\Delta u = c_v(t_2 - t_1) = 1,6166(53,75 - 440) = -624,4$ кДж/кг, при початку відліку від 0 °С; $\Delta u = c_v(T_2 - T_1) = 1,6166(326,75 - 713) = -624,4$ кДж/кг, при початку відліку від 0 К. Зміна питомої ентропії $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1) = 2,0785 \ln(326,75/713) - 0,4619 \ln(3 \cdot 10^5/10^7) = 0$.

Отже, зміна значень калоричних параметрів від значень у початковому стані газу до значень у кінцевому його стані в процесі не залежить від точки початку відліку цих значень та від використаної температурної шкали (Цельсія або Кельвіна).

Зміни калоричних параметрів для всієї маси газу дорівнюють: $\Delta H = m\Delta h = 75,76(-802,8) = 60820$ кДж; $\Delta U = m\Delta u = 75,76(-624,4) \approx -47304$ кДж; $\Delta S = 0$.

Розраховуємо характеристики процесу. Згідно другого закону термодинаміки в рівноважних ізоентропійних (адіабатних) процесах $q = 0$ і $\delta q = 0$ (тобто в цілому за процес і в кожній його точці). Звідси і $Q = 0$.

З рівняння першого закону термодинаміки, записаному у вигляді $q = \Delta u + l$, де l – питома деформаційна (термодинамічна) робота, знаходимо при $q = 0$, що $l = -\Delta u = -c_v(t_2 - t_1) = -1,6166(53,75 - 440) = 624,4$ кДж/кг, тобто газ здійснює роботу (роботу зміни об'єму). Перевіряючи, отримуємо: $l = -\Delta u = R(T_1 - T_2)/(k - 1) = 0,462(713 - 326,75)/(1,2857 - 1) \approx 624,4$ кДж/кг. Для всієї маси газу $L = ml = 75,76 \cdot 624,4 = 47305$ кДж.

З рівняння першого закону термодинаміки, записаного у вигляді $q = \Delta h + l_n$, де l_n – питома робота переміщення, знаходимо при $q = 0$, що $l_n = -\Delta h = -(-802,8) = 802,8$ кДж/кг. Перевірка: $l_n = kl = 1,2857 \cdot 624,4 = 802,8$ кДж/кг. Для всієї маси газу: $L_n = ml_n = 75,76 \cdot 802,8 = 60820$ кДж.

б) теплоємність процесу залежить від температури (за квантово-статистичною теорією).

Розрахунки при залежності теплоємності газу від температури $c = c(T) = \text{var}$ виконуємо, використовуючи таблиці С.Л.Рівкіна газодинамічних функцій газу [3.3], [3.4] для речовини Н₂О як ідеального газу. З цих таблиць при $t_1 = 440$ °С знаходимо при початку відліку значень від 0 К: питома ентальпія $h_1 = 1364,2$ кДж/кг, питома внутрішня енергія $u_1 = 1035,1$ кДж/кг. Питома ентро-

пія розраховується за формулою: $s_1 = s^0(T_1) - R \ln(p_1/p_0)$, де $p_0 = 0,1$ МПа та $s^0(T_1) = 12,1726$ кДж/(кг К). $s_1 = 12,1726 - 0,4619 \ln 10^2 = 10,05$ кДж/(кг К).

Для визначення кінцевої температури газу T_2 використовуємо співвідношення [3.4]: $p_2/p_1 = \pi_{02}(T_2)/\pi_{01}(T_1)$, де значення $\pi_{0i}(T_i)$ визначають за таблицею С.Л.Рівкіна. З цього співвідношення витікає, що $\pi_{02}(T_2) = \pi_{01}(T_1) \cdot P_2/P_1 = 28,507 \cdot 0,3 \cdot 10^6 / 10^7 = 0,8552$. За цим значенням знаходимо з таблиць для H_2O : $T_2 = 311$ К або $t_2 \approx 38$ °С.

Питомий об'єм v_2 визначаємо із співвідношення: $v_2/v_1 = \theta_{02}(T_2)/\theta_{01}(T_1)$, звідки $v_2 = v_1 \theta_{02}(T_2)/\theta_{01}(T_1)$, де $\theta_{01}(T_1) = \theta_{01}(713) = 1177,5$; $\theta_{02}(T_2) = \theta_{02}(310,9) = 17158,8$. Тоді $v_2 = 0,033 \cdot 17158,8 / 1177,5 = 0,481$ м³/кг. Відносна похибка визначення питомого об'єму v_2 за умови $c = \text{const}$ порівняно з визначенням v_2 за умови $c = c(T)$ дорівнює $\delta \approx 4,59$ % в бік збільшення при $c = \text{const}$.

З таблиць газодинамічних функцій при початку відліку від 0 К знаходимо при T_2 : питома ентальпія $h_2 = 573,5$ кДж/кг, питома внутрішня енергія $u_2 = 429,86$ кДж/кг. Питома ентропію газу розраховуємо за формулою: $s_2 = s^0(T_2) - R \ln(p_2/p_0)$, де $p_0 = 0,1$ МПа та $s^0(T_2) = s^0(311 \text{ К}) = 10,5535$ кДж/(кг К). Отже, $s_2 = 10,5535 - 0,462 \ln 3 \approx 10,046$ кДж/(кг К).

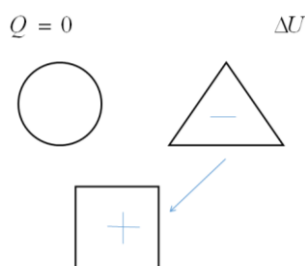
Розраховуємо зміну калоричних параметрів газу. Зміна питомої ентальпії $\Delta h = h_2 - h_1 = 573,5 - 1364,2 = -790,7$ кДж/кг; зміна питомої внутрішньої енергії $\Delta u = u_2 - u_1 = 429,86 - 1035,1 = -605,24$ кДж/кг; зміна питомої ентропії $\Delta s = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln(p_2/p_1) = 10,5535 - 12,1726 - 0,462 \ln 3 = 0$.

З рівняння $\Delta h = \Delta u + \Delta(pv)$, де $\Delta(pv) = R\Delta T$, витікає, що $\Delta h = -605,24 + 0,462(311 - 713) = -790,7$ кДж/кг, що співпадає з визначеним вище значенням.

Зміни калоричних параметрів для всієї маси газу в процесі будуть: $\Delta H = m\Delta h = 75,76(-790,7) \approx -59903$ кДж; $\Delta U = m\Delta u = 75,76(-605,24) \approx -4583$ кДж.

Робота переміщення $L_n = ml_n = m(-\Delta h) = 59903$ кДж. Деформаційна робота $L = ml = m(-\Delta u) = 45853$ кДж.

Схема енергобалансу процесу має вигляд (рис.9.1).



Зміна внутрішньої енергії газу в цьому процесі витрачається на виконання газом деформаційної роботи.

Рис.9.1 Схема енергобалансу

Зображення зміни стану газу в p, v - та T, s -координатах подано на рис.9.2.

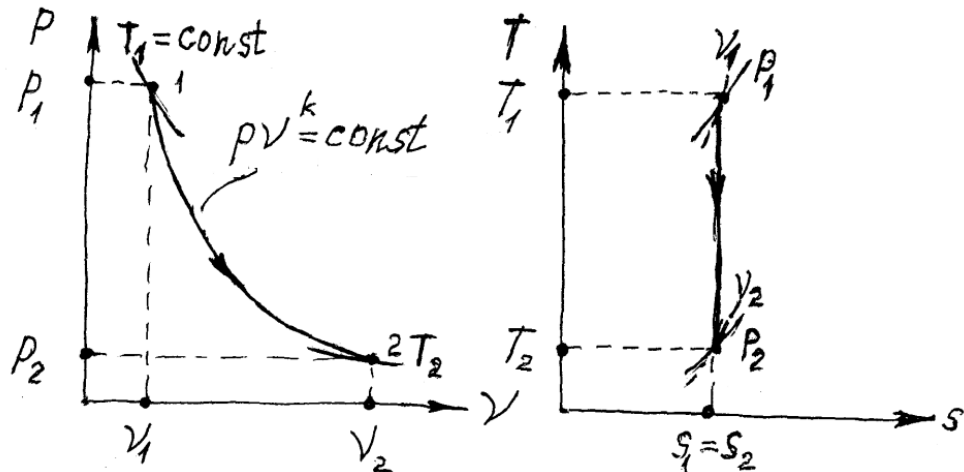


Рис.9.2 Зображення адіабатного процесу в p, v - і T, s -координатах.

Б. Речовина H_2O – реальна пара

а) розрахунок з використанням таблиць термодинамічних властивостей водяної пари

Для визначення початкового стану робочого тіла за тиском $p_1 = 10$ МПа в таблиці «Суха насичена пара та вода на лінії насичення (за тиском)» [2.3], [2.6] знаходимо температуру насичення при цьому тиску: $t_n(p_1) = 310,96$ °С. Оскільки, $t_1 > t_n(p_1)$ то даний стан – перегріта пара. Її параметри визначаємо за таблицею «Вода та перегріта водяна пара» [2.3], [2.4]: За даними p_1, t_1 знаходимо: $v_1 = 0,0291$ м³/кг; $h_1 = 3214,8$ кДж/кг; $s_1 = 6,3837$ кДж/(кг К). Внутрішня енергія $u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 3214,8 - 10^7 \cdot 0,0291 \cdot 10^{-3} = 2923,8$ кДж/кг.

За умовою роботи в точці 2 задано значення одного параметра – абсолютний тиск $p_2 = 0,3$ МПа. Другий параметр, якого не вистачає аби мати два незалежних, знаходимо з умови ізоентропійності процесу; $s = \text{const}$; $s_2 = s_1 = 6,3837$ кДж/(кг К).

Отже, в точці 2 є відомими два незалежних параметри, що надає можливість знайти інші шукані. Для визначення стану пари за тиском в таблиці знаходимо: питома ентропія насиченої рідини $s' = 1,6717$ кДж/(кг К); питома ентропія сухої насиченої пари $s'' = 6,993$ кДж/(кг К).

При даному тиску $p_2 < p_{кр}$ маємо $s' < s_2 < s''$, тобто стан робочого тіла – волога насичена пара. Тоді $s_2 = s_x$. Параметри вологої насиченої пари знаходимо за формулами змішування, визначивши попередньо ступінь (міру) сухості пари.

Ступінь сухості вологої насиченої пари знаходимо з формули змішування: $x_2 = (s_{x_2} - s') / (s'' - s') = (6,3837 - 1,6717) / (6,993 - 1,6717) = 0,8854$. В таблиці за тиском $p_2 = 0,3$ МПа знаходимо: питому ентальпію насиченої рідини $h' = 561,4$ кДж/кг; питому ентальпію сухої насиченої пари $h'' = 2725,5$ кДж/кг; питомий об'єм насиченої рідини $v' = 0,0010735$ м³/кг; питомий об'єм сухої насиченої пари $v'' = 0,60586$ м³/кг. Температура вологої насиченої пари рівна температурі насичення при даному тиску: $t_n(p_2) = 133,54$ °С; $T = 406,54$ К. Питома ентальпія вологої насиченої пари: $h_2 = h_x = h'(1-x) + h''x = 561,4(1-0,8854) + 2725,5 \cdot 0,8854 = 2477,5$ кДж/кг; питомий об'єм вологої насиченої пари: $v_2 = v_x = v'(1-x) + v''x = 0,0010735(1-0,8854) + 0,60586 \cdot 0,8854 = 0,5365$ м³/кг. Питому внутрішню енергію знаходимо за формулою: $u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 2477,5 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,5365 \cdot 10^{-3} = 2316,5$ кДж/кг.

Розраховуємо зміни калоричних параметрів в процесі. Зміна питомої ентальпії: $\Delta h = h_2 - h_1 = 2477,5 - 3214,8 = -737,3$ кДж/кг; зміна питомої внутрішньої енергії: $\Delta u = u_2 - u_1 = 2316,544 - 2923,8 = -607,6$ кДж/кг; зміна питомої ентропії $\Delta s = 0$, оскільки процес ізоентропійний. Маса водяної пари, яка приймає участь в процесі: $m = V_1 / v_1 = 2,5 / 0,0291 = 85,91$ кг. Зміни калоричних параметрів всієї маси газу в процесі: $\Delta H = \Delta h m = -737,3 \cdot 85,91 = -63342$ кДж; $\Delta U = \Delta u \cdot m = -607,26 \cdot 85,91 = -52169$ кДж; $\Delta S = \Delta s \cdot m = 0$.

Визначення характеристик процесу: q, Q, l, l_n, L, L_n . Згідно другому закону термодинаміки в рівноважних ізоентропійних процесах $q = 0$ і $\delta q = 0$. Звідси $Q = qm = 0$. З рівняння енергобалансу для закритих систем, записаного через деформаційну роботу в питомих величинах: $q = \Delta u + l$, у випадку $q = 0$ маємо: $l = -\Delta u$, тобто питома деформаційна робота $l = -\Delta u = 607,26$ кДж/кг. Для всієї маси газу $L = lm = 607,26 \cdot 85,91 = 52169$ кДж. З рівняння енергобалансу для закритих систем, записаного через роботу переміщення в питомих величинах: $q = \Delta h + l_n$. У випадку $q = 0$ маємо: $l_n = -\Delta h$, тобто питома робота переміщення: $l_n = -\Delta h = 737,3$ кДж/кг. Для всієї маси газу: $L_n = l_n m = 737,3 \cdot 85,91 = 63342$ кДж.

Схема енергобалансу подана на рис.9.1.

б) розрахунок з використанням ентропійних діаграм властивостей водяної пари

Діаграма T,s .

За умовою роботи в точці 1 задано два незалежних термічних параметра: абсолютний тиск $p_1 = 10 \text{ МПа}$ і температура $t_1 = 440^\circ\text{C}$. Ці дані дозволяють знайти всі інші шукані величини в цій точці. З метою визначення стану пари за тиском $p_1 < p_{\text{кр}}$ на T,s -діаграмі знаходимо температуру насичення $t_n(p_1) = 310^\circ\text{C}$. Так, як $t_1 > t_n(p_1)$, то даний стан пари – перегріта пара. Її параметри: питома ентальпія $h_1 = 3140 \text{ кДж/кг}$; питома ентропія: $s_1 = 6,3 \text{ кДж/(кг К)}$; питомий об'єм: $v_1 = 0,028 \text{ м}^3/\text{кг}$. Питома внутрішня енергія пари розраховується за формулою: $u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 3140 - 10^7 \cdot 0,028 \cdot 10^{-3} = 2860 \text{ кДж/кг}$.

В точці 2 задане значення одного параметра — абсолютний тиск: $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$. В ізоентропійному процесі, питома ентропія газу залишається сталою: $s_2 = s_1 = 6,3 \text{ кДж/(кг К)}$. Наведені дані дозволяють знайти всі інші шукані. Для визначення кінцевого стану за тиском p_2 на діаграмі T,s знаходимо: питома ентропія насиченої рідини $s' = 1,6 \text{ кДж/(кг К)}$; питома ентропія сухої насиченої пари $s'' = 7 \text{ кДж/(кг К)}$. Оскільки при даному p_2 $s' < s_2 < s''$, то стан реального газу в цій точці – волога насичена пара. В області вологої насиченої пари на перетині ізобари p_2 та ізоентропи s_2 знаходимо точку 2 та її параметри: питомий об'єм $v_2 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$; питому ентальпію $h_2 = 2427 \text{ кДж/кг}$; питому ентропію $s_2 = s_1 = 6,3 \text{ кДж/(кг К)}$. Температура вологої насиченої пари: $t_2 = 135^\circ\text{C}$. Питома внутрішню енергію пари розраховуємо за формулою: $u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2 = 2427 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 2277 \text{ кДж/кг}$.

На рис.9.3 подані зображення процесу зміни стану пари.

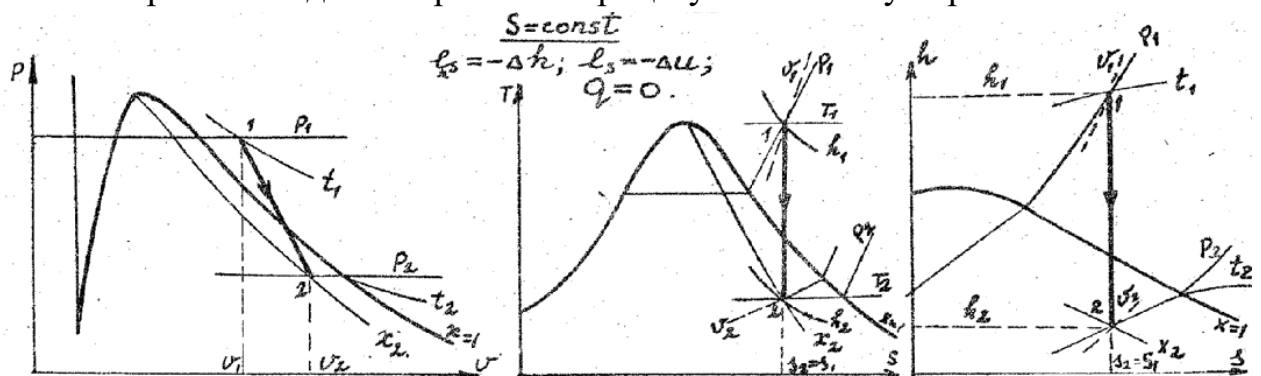


Рис. 9.3. Зображення процесу в p,v -, T,s - і h,s - координатах

Діаграма h,s .

За умовою розрахунку в точці 1 задано два незалежних термічних параметра: абсолютний тиск $p_1 = 10 \text{ МПа}$ і температура $t_1 = 440 \text{ }^\circ\text{C}$. Ці дані дозволяють знайти всі інші шукані величини в цій точці. З метою визначення стану пари за тиском p_1 h,s -діаграмі знаходимо температуру насичення $t_n(p_1) = 310 \text{ }^\circ\text{C}$. Так, як $t_1 > t_n(p_1)$, то даний стан пари – перегріта пара. Її параметри: питомий об'єм $v_1 = 0,029 \text{ м}^3/\text{кг}$; питома ентальпія: $h_1 = 3212 \text{ кДж/кг}$; питома ентропія: $s_1 = 6,37 \text{ кДж/(кг К)}$. Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою: $u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 3212 - 10^7 \cdot 0,029 \cdot 10^{-3} = 2922 \text{ кДж/кг}$. В точці 2 відомий один параметр – абсолютний тиск $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$. Процес ізоентропійний, тому питома ентропія стала величиною: $s_2 = s_1 = 6,37 \text{ кДж/(кг К)}$. Ці дані дозволяють знайти всі інші шукані величини. Для визначення стану пари за тиском p_2 на діаграмі знаходимо: питому ентропію насиченої рідини $s' = s_p \approx c_p \ln \frac{t_n(p_2) + 273}{T_0} = 4,19 \cdot \ln \frac{135 + 273}{273} = 1,68 \text{ кДж/(кг К)}$, де $t_2 = t_n(p_2) = 135 \text{ }^\circ\text{C}$; питому ентропію сухої насиченої пари $s'' = 7 \text{ кДж/(кг К)}$. Оскільки, при даному p_2 $s' < s_2 < s''$, то стан пари в цій точці – волога насичена пара. В області вологої насиченої пари на перетині ізобари p_2 та ізоентропи s_2 знаходимо точку, параметри в якій: питомий об'єм $v_2 = 0,52 \text{ м}^3/\text{кг}$; питома ентальпія $h_2 = 2440 \text{ кДж/кг}$; питома ентропія: $s_2 = s_1 = 6,37 \text{ кДж/(кг К)}$. Питому внутрішню енергію розраховуємо за формулою: $u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2 = 2440 - 0,3 \cdot 10^5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} = 2284 \text{ кДж/кг}$.

Порівняння результатів, отриманих за таблицями і діаграмами

Назва величини, позначення	Таблиці		T,s -діаграма		h,s -діаграма	
	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2	точка 1	точка 2
Абсолютний тиск p , МПа	10	0,3	10	0,3	10	0,3
Питомий об'єм, $v \text{ м}^3/\text{кг}$	0,0291	0,5365	0,028	0,5	0,029	0,52
Температура t , $^\circ\text{C}$	440	133,54	440	135	440	135
Питома ентальпія h , кДж/кг	3214,8	2477,5	3140	2427	3212	2440
Питома ентропія s , кДж/(кг К)	6,3837	6,3837	6,3	6,3	6,37	6,37
Питома внутрішня енергія u , кДж/кг	2923,8	2316,5	2860	2277	2922	2284

ДОДАТКИ

Додаток 1. Довідково-інформаційні таблиці

Таблиця ПІ.1. Співвідношення між деякими одиницями СІ та інших систем

Величина	Одиниці СІ	Співвідношення між одиницями СІ та іншими
Маса	1 кг	1 том=1 кгс ² м ⁻¹ =9,81 кг
Кількість речовин	1 моль 1 кмоль=10 ³ моль	$n=m_0/M$ де n – число кіломолив; m_0 – маса спокою речовини, кг; M – маса кіломоля речовини, кг/кмоль.
Температура	К, Кельвін	1 °C=1 К; $T\text{ К}=t\text{ °C}+273,15$; 1 °F=5/9 °C; $t\text{ °C}=5/9\text{ (°F-32)}$; 1 °Ra=1 °F; $T\text{ К}=5/9\text{ Ra}$; $t\text{ °C}=5/9\text{ Ra}-273,15$.
Сила	Н, Ньютон	1 Н=0,102 кГ
Тиск	Паскаль 1 Па=1 Нм ⁻² 10 ³ Па=1 кПа 10 ⁶ Па=1 МПа	1 ат техн.=1 кгс ² м ⁻² =9,81·10 ⁴ Па=0,981 бар= 10 ⁴ мм вод.ст.=735,6 мм рт.ст. 1 ат физич.=101325 Па=760 мм рт.ст.=1,033·10 ⁴ мм вод.ст. 1 бар=10 ⁵ Па=1,02 ат техн.=1,02·10 ⁴ мм вод.ст.=750,2 мм рт.ст. 1 мм вод. ст.=9,81 Па=7,35·10 ⁻² мм рт.ст. 1 мм рт.ст.=133,3 Па=13,6 мм вод.ст. 1 Па=10 ⁻⁵ бар=1,02·10 ⁻⁴ ат техн.=0,0987·10 ⁻⁴ ат физич.= =7,50062·10 ⁻³ мм рт.ст.
Енергія, робота, кількість теплоти	Джоуль 1 Дж=1 Н·м 1 кДж=10 ³ Дж 1 МДж=10 ⁶ Дж	1 ккал=427 кгм=4,187·10 ³ Дж=4,187 кДж=1,16·10 ⁻³ кВт·ч 1 кВт·ч=3,6·10 ⁶ Дж=860 ккал 1 кДж=102 кгм=0,2388 ккал=0,278·10 ⁻³ кВт·ч 1 кгм=9,81 Дж=2,34·10 ⁻³ ккал=2,72·10 ⁻⁶ кВт·ч
Потужність, тепловий потік	Вт, Ватт 1 кВт=10 ³ Вт 1 МВт=10 ⁶ Вт	1 Вт=0,86 ккал·ч ⁻¹ =1,3·10 ⁻³ л.с.=0,239 кал·с ⁻¹ =0,102 кгм·с ⁻¹ 1 ккал·ч ⁻¹ =1,163 Вт 1 кал·с ⁻¹ =4,187 Вт=5,69·10 ⁻³ л.с. 1 л.с.=736 Вт=175,5 кал·с ⁻¹ =75 кгм·с ⁻¹
Питомі теплоємність, ентропія	Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹ =0,2388·10 ⁻³ ккал·кг ⁻¹ ·К ⁻¹
Питомі теплоти плавлення, пароутворення, конденсації	Дж·кг ⁻¹	1 Дж·кг ⁻¹ =0,2388·10 ⁻³ ккал·кг ⁻¹

Таблиця ПІ.2. Приставки для утворення та позначення кратних та дільних одиниць

Приставки кратних одиниць	Відношення до основної одиниці	Позначення	Приставки кратних одиниць	Відношення до основної одиниці	Позначення
Пета	10 ¹⁵	П	Деці	10 ⁻¹	д
Тера	10 ¹²	Т	Санті	10 ⁻²	с
Гіга	10 ⁹	Г	Мілі	10 ⁻³	м
Мега	10 ⁶	М	Мікро	10 ⁻⁶	мк
Кіло	10 ³	к	Нано	10 ⁻⁹	н
Гекто	10 ²	г	Піко	10 ⁻¹²	п
Дека	10 ¹	да			

Таблиця III.3. Молекулярні маси деяких газів

Газ	Хімічне позначення	Молекулярна маса	Газ	Хімічне позначення	Молекулярна маса
Азот	N ₂	28,016	Гелій	He	4,003
Аргон	Ar	39,944	Кисень	O ₂	32,000
Водень	H ₂ O	2,016	Окис вуглецю	CO	28,01
Водяна пара	Повітря	18,016	Повітря	-	28,97

Таблиця III.4. Мольні теплоємності газів при сталому тиску
μс_p, кДж/(кмоль·К) [2.7], [2.4]

Газ	Середні теплоємності	Істинні теплоємності	Істинні теплоємності (інтерполяційні формули)
N ₂	28,97+0,00257t	28,72 + 0,005t – 1,256 · 10 ⁻⁹ t ²	28,5372+0,0053905t
H ₂	28,78+0,00112t	29,1 – 0,000209t + 2,324 · 10 ⁻⁶ t ²	28,3446+0,0031518t
H ₂ O	32,88+0,00544t	32,91+0,0113t – 0,159 · 10 ⁻⁹ t ²	32,8367+0,0116611t
Повітря	29,09+0,00241t	28,89+0,00623t – 0,837 · 10 ⁻⁶ t ²	28,7558+0,0057208t
O ₂	29,55+0,00340t	28,97 + 0,0106t – 3,55 · 10 ⁻⁶ t ²	29,5802+0,0069706t
CO	29,05+0,00282t	28,68+0,00706t – 1,419 · 10 ⁻⁵ t ²	28,7395+0,0058862t
CO ₂	36,04 + 0,02t – 6,4 · 10 ⁻⁶ t ²	36,84 – 0,0401t – 2,68 · 10 ⁻⁵ t ² + 6,99 · 10 ⁻⁹ t ³	41,3597+0,0144985t
SO ₂	–	–	42,8728+0,0132043t

Таблиця III.5. Психрометрична таблиця [3.6]

Показ. «мок- рого» термо- метру, °C	Різниця показань сухого і «мокрого» термометрів																				
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16	11	7	3					
1	100	90	82	74	66	59	52	45	39	33	29	23	19	16	11	7					
2	100	90	83	75	67	61	54	47	42	35	31	26	23	18	14	10					
3	100	90	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	26	21	17	13	10				
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	36	32	28	24	20	16	14	11			
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30	27	23	19	17	13	10		
6	100	92	85	78	72	66	61	56	50	45	41	35	33	29	26	22	19	16	13	10	
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35	31	28	25	22	18	15	12	11
8	100	92	86	80	74	68	63	58	54	49	45	41	37	33	30	27	25	21	18	15	14
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39	35	32	29	27	24	21	18	17
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41	38	34	31	28	26	23	21	19
11	100	94	88	82	77	72	67	62	58	55	50	47	43	40	36	33	30	28	25	23	20
12	100	94	88	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44	42	38	35	32	30	27	25	22
13	100	94	88	83	78	73	69	64	61	57	53	50	46	43	40	37	34	32	29	27	24

Показ. «мок- рого» термо- метру, °C	Різниця показань сухого і «мокрого» термометрів																					
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47	45	41	30	36	34	31	29	26	
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49	46	43	41	37	35	33	31	28	
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50	48	44	42	39	37	34	32	30	
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52	49	46	44	40	39	36	34	31	
18	100	95	90	85	81	76	74	69	66	62	59	56	53	50	47	45	42	40	37	35	33	
19	100	95	91	85	82	77	74	70	66	63	60	57	54	51	48	46	43	41	39	37	34	
20	100	95	91	86	82	78	75	71	67	64	61	58	55	53	49	47	44	43	40	38	36	
21	100	95	91	86	83	79	75	71	68	65	62	59	56	54	51	49	46	44	41	39	37	
22	100	95	91	87	83	79	76	72	69	65	63	60	57	55	52	50	47	45	42	40	38	
23	100	96	91	87	83	80	76	72	69	66	63	61	58	56	53	51	48	46	43	41	39	
24	100	96	92	88	84	80	77	73	70	67	64	62	59	56	53	52	49	47	44	42	40	
25	100	96	92	88	84	81	77	74	70	68	65	63	59	58	54	52	50	47	45	44	42	
26	100	96	92	88	85	81	78	74	71	68	65	63	60	58	55	53	51	49	46	45	43	
27	100	96	92	89	85	81	78	75	72	69	66	64	61	59	56	54	51	50	47	46	43	
28	100	96	92	88	85	82	79	75	72	69	67	65	62	60	57	54	52	51	48	47	45	
29	100	96	92	89	85	82	79	75	73	71	67	65	62	60	57	55	53	52	49	48	46	
30	100	96	93	89	86	82	79	77	73	71	68	66	63	61	58	56	55	53	51	49	47	
31	100	96	93	89	85	83	80	77	74	72	69	67	64	61	59	57	55	54	51	50	48	
32	100	96	93	89	87	83	80	77	75	72	70	67	65	62	60	58	56	54	53	51	48	
33	100	96	93	89	86	83	80	78	75	72	70	68	66	63	61	59	57	55	53	51	49	
34	100	96	93	90	86	83	81	78	76	73	71	69	66	64	62	59	57	55	54	52	50	
35	100	96	93	89	87	83	81	79	76	74	71	69	67	65	62	60	58	56	55	52	51	
36	100	96	93	89	87	84	82	79	77	74	72	70	67	65	63	60	59	57	55	53	51	
37	100	96	93	90	87	85	82	79	77	75	72	70	68	65	63	61	59	57	55	53	52	
38	100	97	94	91	88	85	82	80	77	75	73	70	68	66	64	61	59	57	56	54	52	
39	100	96	94	91	88	85	82	80	77	75	73	71	69	66	64	62	59	58	56	54	53	
40	100	97	94	91	88	85	82	80	78	76	73	71	68	66	64	62	60	58	57	55	54	
41	100	97	94	91	88	85	83	80	78	75	73	71	68	66	65	63	61	59	58	56	54	
42	100	97	94	91	88	85	83	80	78	76	73	71	69	67	65	63	61	59	58	56	55	
43	100	97	94	91	88	86	83	81	78	76	73	72	69	67	65	64	62	60	59	57	55	
44	100	97	94	91	89	86	83	81	78	76	74	72	70	68	66	64	63	61	59	57	55	
45	100	97	94	91	89	86	84	81	79	77	75	72	70	68	66	65	63	61	59	57	56	

Таблиця ПІ.6. Залежність тиску насичення p_H водяної пари від температури [2.1], [2.6]

$t, ^\circ\text{C}$	p_H мм рт. ст.	$p_H \cdot 10^4$ МПа	$t, ^\circ\text{C}$	p_H мм рт. ст.	$p_H \cdot 10^4$ МПа	$t, ^\circ\text{C}$	p_H мм рт. ст.	$p_H \cdot 10^2$ МПа
-27	0,383	0,511	16	13,63	18,170	60	149,4	1,9919
-26	0,425	0,567	17	14,53	19,364	61	156,4	2,0859
-25	0,471	0,628	18	15,48	20,626	62	163,8	2,1837
-24	0,521	0,695	19	16,48	21,960	63	171,4	2,2854
-23	0,576	0,768	20	17,54	23,368	64	179,3	2,3910
-22	0,636	0,848	21	18,65	24,855	65	187,5	2,5008

Продовження таблиці ПІ.6

$t, ^\circ\text{C}$	P_{H} мм рт. ст.	$P_{\text{H}} \cdot 10^4$ МПа	$t, ^\circ\text{C}$	P_{H} мм рт. ст.	$P_{\text{H}} \cdot 10^4$ МПа	$t, ^\circ\text{C}$	P_{H} мм рт. ст.	$P_{\text{H}} \cdot 10^2$ МПа
-21	0,701	0,935	22	19,83	26,424	66	196,1	2,6148
-20	0,772	1,029	23	21,07	28,779	67	205,0	2,7332
-19	0,850	1,133	24	22,38	29,824	68	214,2	2,8561
-18	0,935	1,247	25	23,76	31,663	69	223,7	2,9837
-17	1,027	1,369	26	25,21	33,600	70	233,7	3,1161
-16	1,128	1,504	27	26,74	35,639	71	243,9	3,2533
-15	1,238	1,651	28	28,35	37,785	72	254,6	3,3957
-14	1,357	1,809	29	30,04	40,043	73	265,7	3,5433
-13	1,486	1,981	30	31,82	42,417	74	277,2	3,6963
-12	1,627	2,169	31	33,70	44,913	75	289,1	3,8548
-11	1,780	2,373	32	35,66	47,536	76	301,4	4,0190
-10	1,946	2,594	33	37,73	50,290	77	314,1	4,1890
-9	2,125	2,833	34	39,90	53,182	78	327,3	4,3650
-8	2,321	3,094	35	42,18	56,217	79	341,0	4,5473
-7	2,532	3,376	36	44,56	59,401	80	355,1	4,7359
-6	2,761	3,681	37	47,07	62,740	81	369,7	4,9310
-5	3,008	4,010	38	49,65	66,240	82	384,9	5,1328
-4	3,276	4,368	39	52,44	69,907	83	400,6	5,3415
-3	3,566	4,754	40	55,32	73,749	84	416,8	5,5572
-2	3,879	5,172	41	58,34	77,772	85	433,6	5,7803
-1	4,216	5,621	42	61,50	81,983	86	450,9	6,0107
0	4,579	6,108	43	64,80	86,390	87	468,7	6,2488
+1	4,93	6,566	44	68,26	90,998	88	487,1	6,4947
2	5,29	7,054	45	71,88	95,817	89	506,1	6,7486
3	5,69	7,575	46	75,65	100,850	90	525,8	7,0108
4	6,10	8,129	47	79,60	106,12	91	546,1	7,2814
5	6,54	8,718	48	83,71	111,61	92	567,0	7,5607
6	7,01	9,346	49	88,02	117,35	93	588,6	7,8488
7	7,51	10,01	50	92,51	123,35	94	610,9	8,1460
8	8,05	10,721	51	97,20	129,60	95	633,9	8,4525
9	8,61	11,473	52	102,1	136,12	96	657,6	8,7685
10	9,21	12,271	53	107,2	142,92	97	682,1	9,0943
11	9,84	13,118	54	112,5	150,01	98	707,3	9,4301
12	10,52	14,015	55	118,0	157,40	99	733,2	9,7760
13	11,23	14,967	56	123,8	165,10	100	760,2	10,1325
14	11,99	15,974	57	129,8	173,12	101	787,7	10,500
15	12,79	17,041	58	136,1	181,46	102	816,1	10,878

Таблиця III.7. Середня масова теплоємність газів при сталому тиску, кДж/(кгК) [2.4]

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	Повітря
0	0,915	1,039	1,040	0,815	1,859	1,004
100	0,923	1,040	1,042	0,866	1,873	1,006
200	0,935	1,044	1,046	0,910	1,894	1,012
300	0,950	1,049	1,054	0,949	1,919	1,019
400	0,965	1,057	1,063	0,983	1,948	1,028
500	0,979	1,066	1,075	1,013	1,978	1,039
600	0,993	1,076	1,086	1,040	2,009	1,050
700	1,005	1,087	1,098	1,064	2,042	1,060
800	1,016	1,097	1,109	1,085	2,075	1,071
900	1,026	1,108	1,120	1,104	2,110	1,082
1000	1,035	1,118	1,130	1,122	2,144	1,091

Таблиця III.8. Середня масова теплоємність газів при сталому об'ємі, кДж/(кгК) [2.4]

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	Повітря
0	0,655	0,742	0,743	0,626	1,398	0,716
100	0,663	0,743	0,745	0,677	1,411	0,719
200	0,675	0,746	0,749	0,721	1,432	0,724
300	0,690	0,752	0,757	0,760	1,457	0,732
400	0,705	0,760	0,767	0,794	1,486	0,742
500	0,719	0,769	0,778	0,824	1,516	0,752
600	0,733	0,779	0,789	0,851	1,547	0,762
700	0,745	0,790	0,801	0,875	1,580	0,773
800	0,756	0,800	0,812	0,896	1,614	0,784
900	0,766	0,811	0,823	0,916	1,648	0,794
1000	0,775	0,821	0,834	0,933	1,682	0,804

Таблиця III.9. Середні в інтервалі температур від 0 до $t, ^\circ\text{C}$ об'ємні теплоємності газів при сталому тиску, кДж/(м³К) [2.4]

$t,$ °C	CO ₂ кДж/(м ³ К)	N ₂ кДж/(м ³ К)	O ₂ кДж/(м ³ К)	H ₂ O кДж/(м ³ К)	Повітря кДж/(м ³ К)	CO кДж/(м ³ К)
0	1,6204	1,3327	1,3076	1,4914	1,3009	1,3021
100	1,7200	1,3013	1,3193	1,5019	0,3051	1,3021
200	1,8079	1,3030	1,3369	1,5174	1,3097	1,3105
300	1,8808	1,3080	1,3583	1,5379	1,3181	1,3231
400	1,9436	1,3172	1,3796	1,5592	1,3302	1,3315
500	2,0453	1,3294	1,4005	1,5831	1,3440	1,3440
600	2,0592	1,3419	1,4152	1,6078	1,3583	1,3607
700	2,1077	1,3553	1,4370	1,6338	1,3725	1,3733
800	2,1517	1,3683	1,4529	1,6601	1,3821	1,3901
900	2,1915	1,3817	1,4663	1,6865	1,3993	1,4026
1000	2,2266	1,3938	1,4801	1,7133	1,4118	1,4152

Таблиця ПІ.10 Термодинамічні функції повітря за СЛ.Ривкіним [3.3]

$t, ^\circ\text{C}$	$h, \text{кДж/кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	π_0	θ_0	$s^0, \text{кДж/(кгК)}$
0	273,2	194,8	0,9985	8005	6,6081
100	373,8	266,7	2,9798	3666	6,9218
200	475,4	339,6	6,9064	2005	7,1630
300	578,8	414,3	13,778	1217,6	7,3612
400	684,5	491,2	24,896	791,4	7,5310
500	792,4	570,5	41,919	539,9	7,6806
600	902,8	652,2	66,913	382,0	7,8148

Таблиця ПІ.11 Значення мольних теплоємностей газів при сталому об'ємі та сталому тиску

Гази	Теплоємність, кДж/(кмоль К)	
	μ_{c_v}	μ_{c_p}
Одноатомні	12,56	20,93
Двоатомні	20,93	29,31
Три- та багатоатомні	29,31	37,68

Таблиця ПІ.12 Формули для розрахунку газових сумішей

Спосіб завдання суміші	Питомий об'єм суміші	Уявна молекулярна маса *	Газова стала суміші	Парціальний тиск суміші	Перерахунок складів
Масові частки	$v_{cm} = \sum_1^n \frac{m_i}{\rho_i}$ $\rho_{cm} = \frac{1}{v_{cm}}$	$\mu_{cm} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$R_{cm} = \sum_1^n m_i R_i$	$p_i = m_i \frac{R_i}{R_{cm}} p$	$r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$
Об'ємні частки	$v_{cm} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{r_i \rho_i}}$	$\mu_{cm} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$R_{cm} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$p_i = r_i p$	$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$

* Це молекулярна маса деякого віртуального однорідного газу тієї ж маси і з такими ж термодинамічними властивостями, як і у суміші.

Таблиця ПІ.13 Формули для розрахунку процесів водяної пари

Процеси	Зміна внутрішньої енергії	Кількість роботи	Кількість теплоти
Ізохорний	$\Delta u = (i_2 - p_2 v) - (i_1 - p_1 v) = i_2 - i_1 - v(p_2 - p_1)$	$l = 0$	$q = \Delta u$
Ізобарний	$\Delta u = (i_2 - p v_2) - (i_1 - p v_1) = i_2 - i_1 - p(v_2 - v_1)$	$l = q - \Delta u = p(v_2 - v_1)$	$q = i_2 - i_1$
Ізотермічний	$\Delta u = (i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1)$	$l = q - \Delta u$	$q = T(s_2 - s_1)$
Адіабатний	$\Delta u = (i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1)$	$l = -\Delta u = u_1 - u_2$	$q = 0$

Таблиця ПІ.14 Групи політропних процесів

Група	Границі зміни показника політропи	Δu	q	Теплоємність в процесі
I	$1 > n > -\infty$	$\Delta u > 0$	$q > 0$	$c_n > 0$
II	$k > n > 1$	$\Delta u < 0$	$q > 0$	$c_n < 0$
III	$+\infty > n > k$	$\Delta u < 0$	$q < 0$	$c_n > 0$

Таблиця ПІ.15 Властивості ідеальних газів

Число Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ кмоль}^{-1}$
Число Лошмідта (число молекул в одиниці об'єму газу за нормальних умов)	$N_L = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
Стала Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ДжК}^{-1}$
Універсальна газова стала	$R_\mu = k N_A 10^3 = 8314 \text{ Дж/(кмоль К)}$
Об'єм одного кіломоля ідеального газу за нормальних умов	$V_\mu = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$
Рівняння Клапейрона	$p\nu = RT$
Рівняння Авогадро-Клапейрона	$pV_\mu = R_\mu T$
Рівняння Менделєєва-Клапейрона	$pV = mR_\mu T / \mu$
Закон Майєра	$\mu c_p - \mu c_v = R_\mu \text{ або } c_p - c_v = R$

Таблиця ПІ.16 Співвідношення для розрахунків Δu та Δs ідеального газу

Розрахунок Δu			
Δu	$c = \text{const}$	$c = c(t)$	
$\int_{T_1}^{T_2} c_v dT$	$c_v (T_2 - T_1) = c_v (t_2 - t_1)$	$c_{vm} \big _{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1)$	
$\int_{273}^{T_2} c_v dT - \int_{273}^{T_1} c_v dT$	$c_v t_2 - c_v t_1 = c_v (t_2 - t_1)$	$c_{vm} \big _0^{t_2} t_2 - c_{vm} \big _0^{t_1} t_1$	$u_i = \int_0^{t_i} c_v dt *$
$\int_0^{t_2} c_v dt - \int_{273}^{t_1} c_v dt$	$c_v T_2 - c_v T_1 = c_v (T_2 - T_1)$	$u_2 - u_1$	$u_i = \int_0^{T_i} c_v dT *$

* визначають за таблицями Л.С.Рівкіна

Розрахунок Δs		
Δs	$c = \text{const}$	$c = c(t)$
$\int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}$	$c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$	Складно для практичних розрахунків
$\left(\int_{T_0}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R \int_{p_0}^{p_2} \frac{dp}{p} \right) -$ $-\left(\int_{T_0}^{T_1} c_p \frac{dT}{T} - R \int_{p_0}^{p_1} \frac{dp}{p} \right)$	$s_2 - s_1$, де	$s_2 - s_1 = s_{02} - s_{01} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$
	$s_i = c_p \ln \frac{T_i}{273} - R \ln \frac{p_i}{p_0}$	$s_i = s_{0i} - R \ln \frac{p_i}{p_0} *$
$\left(\int_0^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R \int_{p_0}^{p_2} \frac{dp}{p} \right) -$ $-\left(\int_0^{T_1} c_p \frac{dT}{T} - R \int_{p_0}^{p_1} \frac{dp}{p} \right)$	не можливо	$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1}$
	не можливо	$s_i = s_i^0 - R \ln \frac{p_i}{p_0}$
* $s_{0i} = \int_{273}^T c_p \frac{dT}{T}$ – визначають за таблицями газодинамічних функцій;		
** $s_i^0 = \int_0^T c_p \frac{dT}{T}$ – визначають за таблицями газодинамічних функцій.		

Додаток 2. Вихідні дані для варіантних розрахунків задач

Таблиця П.2.1. Вихідні дані до задачі 3.8

№ п/п	ΔU_{12} кДж	Q_{21} кДж	L_{12} кДж	№ п/п	ΔU_{12} кДж	Q_{21} кДж	L_{12} кДж
1	-30	-10	60	14	-280	120	240
2	-70	30	60	15	120	-440	240
3	30	-110	60	16	200	-600	600
4	50	-150	150	17	30	30	-40
5	-60	-20	120	18	70	-10	-40
6	-140	60	120	19	-50	-30	60
7	60	-220	120	20	-120	20	40
8	100	-300	300	21	-360	60	120
9	-90	-30	180	22	140	-20	-80
10	-210	90	180	23	-100	-60	120
11	90	-330	180	24	-240	40	80
12	150	-450	450	25	60	60	-80
13	-120	-40	240	-	-	-	-

Таблиця П.2.2. Вихідні дані до задачі 3.9

№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta S,$ кДж/К	$L,$ кДж	№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	$\Delta S,$ кДж/К	$L,$ кДж
1	2	3	4	5	6	7	8
1	57	-25	-200	14	227	+8	+5000
2	27	5	2000	15	-223	-8	+5000
3	-73	-5	2000	16	-33	+8	-5000
4	-23	5	-2000	17	227	-12	-5000
5	27	-8	-2000	18	227	+12	+5000
6	27	+8	+2000	19	227	-8	-5000
7	27	-5	-2000	20	327	+9	+7000
8	127	+6	+3000	21	-23	-9	+7000
9	-123	-6	+3000	22	-103	+9	-7000
10	-53	+6	-3000	23	327	-15	-7000
11	127	-9	-3000	24	327	+15	+7000
12	127	+9	+3000	25	327	-9	-7000
13	127	-6	-3000	-	-	-	-

Таблиця П.2.3. Вихідні дані до задачі 4.9

T_{Γ}, K	T_{χ}, K	$\Delta S_{\Gamma}, \text{кВт/К}$	$\Delta S_{\chi}, \text{кВт/К}$	$Q_{\Gamma}, \text{кВт}$	$Q_{\chi}, \text{кВт}$	$N, \text{кВт}$	η_t
565	300	0,45	0,45	250	135	115	0,46

Варіанти завдання

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}
T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{χ}	Q_{Γ}	Q_{Γ}	Q_{Γ}	N
ΔS_{Γ}	ΔS_{χ}	Q_{Γ}	Q_{χ}	N	η_t	Q_{χ}	N	η_t	Q_{χ}	N	η_t	η_t

Варіанти завдання

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
T_{Γ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{χ}	ΔS_{χ}
Q_{χ}	ΔS_{χ}	ΔS_{χ}	Q_{Γ}	Q_{Γ}	Q_{χ}	Q_{χ}	N	Q_{Γ}	N	Q_{Γ}	N
N	Q_{Γ}	η_t	Q_{χ}	N	N	η_t	η_t	Q_{χ}	η_t	Q_{χ}	η_t

Таблиця П.2.4. Вихідні дані до задачі 4.10

T_{Γ}, K	T_{χ}, K	$\Delta S_{\Gamma}, \text{кВт/К}$	$\Delta S_{\chi}, \text{кВт/К}$	$Q_{\Gamma}, \text{кВт}$	$Q_{\chi}, \text{кВт}$	$N, \text{кВт}$	ε
293	263	0,0265	0,0265	7,77	6,98	0,793	8,77

Варіанти завдання

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ΔS_{χ}	ΔS_{χ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{Γ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{Γ}	T_{Γ}
N	Q_{Γ}	N	Q_{Γ}	N	Q_{χ}	Q_{χ}	Q_{Γ}	Q_{Γ}	ΔS_{χ}	ΔS_{χ}	Q_{χ}	N
ε	Q_{χ}	ε	Q_{χ}	ε	ε	N	N	Q_{χ}	ε	ΔS_{Γ}	N	ε

Варіанти завдання

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}
Q_{Γ}	Q_{Γ}	Q_{Γ}	ΔS_{χ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{Γ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}
ε	N	Q_{χ}	ε	N	Q_{χ}	ε	N	Q_{χ}	Q_{Γ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{Γ}

Таблиця П.2.5. Вихідні дані до задачі 4.11

T_{Γ}, K	T_{χ}, K	$\Delta S_{\Gamma}, \text{кВт/К}$	$\Delta S_{\chi}, \text{кВт/К}$	$Q_{\Gamma}, \text{кВт}$	$Q_{\chi}, \text{кВт}$	$N, \text{кВт}$	φ
295	269	0,0508	0,0508	15	13,67	1,33	11,3

Варіанти завдання

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{χ}	ΔS_{χ}	T_{Γ}	T_{Γ}
ΔS_{χ}	ΔS_{χ}	Q_{Γ}	Q_{Γ}	Q_{χ}	Q_{χ}	N	Q_{Γ}	N	Q_{Γ}	N	T_{χ}	T_{χ}
ΔS_{Γ}	φ	Q_{χ}	N	N	φ	φ	Q_{χ}	φ	Q_{χ}	φ	ΔS_{Γ}	ΔS_{χ}

Варіанти завдання

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}	T_{Γ}
T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	T_{χ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{Γ}	ΔS_{χ}	Q_{Γ}	Q_{Γ}	Q_{Γ}	N	Q_{χ}
Q_{Γ}	Q_{χ}	N	φ	Q_{χ}	N	φ	Q_{χ}	N	φ	φ	N

Таблиця П.2.6. Вихідні дані до задачі 5.15

№	Газ	p_1 , МПа	t_1 , °C	p_2 , МПа	№	Газ	p_1 , МПа	t_1 , °C	p_2 , МПа
1 2	П* Г*	1,0	700	0,01	14 15	П Г	0,4	700	0,01
3 4	П Г	0,9	700	0,01	16 17	П Г	0,3	700	0,01
5 6	П Г	0,8	700	0,01	18 19	П Г	0,2	700	0,01
7 8	П Г	0,7	700	0,01	20 21	П Г	0,1	700	0,01
9 10	П Г	0,6	700	0,01	22 23	П Г	1,2	700	0,4
11 12	П Г	0,5	700	0,01	24 25	П Г	0,3	700	0,15
13	П	1,2	500	0,3	26	Г	1,5	500	0,3

*) П – повітря; Г – вуглекислий газ

Таблиця П.2.7. Вихідні дані до задачі 5.16

№	Газ	p_1 , МПа	t_1 , °C	p_2 , МПа	№	Газ	p_1 , МПа	t_1 , °C	p_2 , МПа
1	П*	10,0	800	0,1	14	CO ₂	0,12	400	0,01
2	O ₂	6,0	400	0,1	15	H ₂ O	10,0	500	2,0
3	N ₂	2,5	500	0,1	16	H ₂ O	0,4	200	0,2
4	CO ₂	4,4	600	0,2	17	CO ₂	0,7	300	0,02
5	H ₂ O	4,0	400	0,04	18	N ₂	0,1	400	0,01
6	H ₂ O	0,5	300	0,05	19	O ₂	2,0	250	0,4
7	CO ₂	0,9	500	0,3	20	П*	0,3	500	0,15
8	N ₂	3,0	600	1,5	21	O ₂	0,6	200	0,2
9	O ₂	1,2	350	0,04	22	H ₂	10,0	150	1,0
10	П*	0,1	700	0,01	23	He	3,0	300	0,3
11	П*	1,5	600	0,3	24	Ar	15,0	1000	0,1
12	O ₂	0,15	300	0,01	25	N ₂	1,0	300	0,02
13	N ₂	0,6	700	0,15	26	CO ₂	6,3	200	0,09

*) П – повітря

Таблиця П.2.8. Вихідні дані до задачі 6.16

№	m , кг/с	w , м/с	p , МПа	x , кг _{снп} /кг _{впп}	№	m , кг/с	w , м/с	t , °C	x , кг _{снп} /кг _{впп}
1	1,5	20	5	0,88	14	3,0	10	300	0,90
2	1,0	15	4	0,90	15	1,0	15	250	0,92
3	0,5	10	3	0,92	16	1,5	20	200	0,94
4	0,5	10	2	0,94	17	2,0	30	150	0,96
5	1,0	15	1	0,96	18	2,5	40	100	0,98
6	1,5	20	0,5	1,0	19	3,0	50	50	1,0
№	m , кг/с	w , м/с	p , МПа	t , °C	№	m , кг/с	w , м/с	p , МПа	t , °C
7	1,0	10	0,01	100	20	4,5	30	5	300
8	1,5	15	0,1	150	21	5,0	25	6	350
9	2,0	20	0,5	180	22	6,0	20	7	400
10	2,5	30	1	200	23	7,0	15	8	450
11	3,0	40	2	240	24	8,0	10	9	475
12	3,5	50	3	250	25	9,0	15	10	500
13	4,0	40	4	280	26	10,0	20	15	500

Таблиця П.2.9. Вихідні дані до задачі 6.24

№	p_1 , МПа	t_1 , °C	ν_1 , м ³ /кг	x_1	p_2 , МПа	t_2 , °C	ν_2 , м ³ /кг	x_2
1	3	300			0,05			
2	5	450				80		
3	0,6	365					$5\nu_1$	
4	2		0,14			50		
5	0,2			0,8				1
6	2			0,95	10			
7	4	390						0,84
8	9	480			0,004			
9	1,5			1			0,5	
10		400	0,5				1,0	
11	1,8	250						-400*
12	2		0,1		0,2			
13	0,4			0,8	0,06			
14	0,9	320						0,96
15	1,4	300			0,006			

Продовження таблиці П2.9

16				-260*		80		0,92
17		410				80		0,96
18		80		0,9	0,5			
19	0,8			0,95	0,004			
20	3,5	320						1,0
21	2	300			0,004			
22	6	440				200		
23	10			1,0				0,69
24	0,1			1,0	1,5			
25	10	590						1,0
26	1,5	60**			0,1			

*) Задано Δh , кДж/кг; **) Задано перегрів пари.

Таблиця П.2.10. Вихідні дані до задачі 6.25

№	Про- цес 1-2	p_1 , МПа	t_1 , °C	x_1	q_{1-2} , кДж/ кг	p_2 , МПа	t_2 , °C	x_2	Про- цес 2-3	q_{2-3} , кДж/ кг	p_3 , МПа	t_3 , °C	x_3
1	s	5,0	450			0,004			T				
2	p	1,0		0,8	1000				s		0,004		
3	s	4,0	400			0,005			p	200			
4	s	0,004		0,85				1,0	p	800			
5	p	0,1	200		300				s		1,0		
6	p	0,004		0,8				1,0	s			400	
7	p	0,6	300		-100				s		0,005		
8	s	0,004		0,9			450		p				1,0
9	T	6,0	450			4,0			p	-400			
10	T	1,0	500		-100				s		0,005		
11	s	0,004		0,8				1,0	p			400	
12	s	0,6	300					1,0	p	-300			
13	p	0,05		0,9	-300				s			450	
14	p	1,0	300		-400				T		0,1		
15	s	1,0		0,9				1,0	T		0,05		
16	p	0,5	300					1,0	s				0,8
17	T	0,005	160					1,0	p	400			
18	s	1,0	500				250		p				1,0
19	p	0,01		0,9	500				T				1,0
20	T	0,1		0,85		0,01			s		0,1		
21	T	0,05	200					1,0	p	500			

№	Процес 1-2	p_1 , МПа	x_1	p_2 , МПа	h_2 , кДж	x_2	v_2 , м ³ /кг	Процес 2-3	t_3 , °C	h_3 , кДж	v_3 , м ³ /кг	s_3 , кДж
					кг					кг		(кгК)
22	T	0,2	1,0		2720			s	350	$h_2 +$ +420		
23	s	0,5	0,85	5,0				T				
24	v	0,5	0,8			1,0		T			20	
25	T	0,5	0,95				1,0	v				8

В стовпчиках «Процес 1-2» і «Процес 2-3» вказані параметри, які залишаються незмінними в цих процесах. p – ізобарний процес; T – ізотермічний процес; v – ізохорний процес; s – адіабатний процес. x_1 , x_2 , x_3 – міра сухості.

Таблиця П2.11. Вихідні дані до задачі 7.21

t_1 , °C	50	55	60	65	70	50	55	60	65	70	50	55	60	65	70
ϕ_1 , %	35	30	25	20	25	30	20	25	25	20	25	25	20	25	15
t_2' , °C	10	11	12	13	14	15	15	16	13	14	10	11	12	10	13
t_2'' , °C	25	26	27	28	29	20	20	25	27	28	18	21	22	28	25
F , м ²	18	17	15	20	21	22	23	24	25	24	23	22	21	20	15
k , Вт/(м ² К)	40	41	42	43	44	45	46	45	44	43	42	41	40	41	42

Таблиця П2.12. Вихідні дані до задачі 7.22

№п/п	X_1	X_2	X_3	X_4		№п/п	X_1	X_2	X_3	X_4
1	$t=0$	$\phi=80$	d	$t=80$		16	$t=30$	$t^M=15$	d	$h=160$
2	$t=10$	$\phi=50$	d	$t=90$		17	$t=10$	$t^M=5$	d	$t=95$
3	$t=20$	$\phi=90$	d	$t=190$		18	$t=100$	$t^M=35$	d	$t=30$
4	$t=50$	$\phi=5$	d	$t=110$		19	$t=95$	$t^M=45$	d	$\phi=100$
5	$t=95$	$\phi=10$	d	$t=45$		20	$t=50$	$\phi=5$	h	$t=23$
6	$t=20$	$\phi=30$	d	$\phi=5$		21	$t=120$	$h=280$	d	$\phi=100$
7	$t=95$	$\phi=5$	d	$\phi=90$		22	$t=130$	$h=200$	h	$\phi=90$
8	$t=95$	$\phi=10$	d	$\phi=100$		23	$t=50$	$d=50$	h	$t=95$
9	$t=35$	$\phi=90$	d	$\phi=5$		24	$t=90$	$d=2$	h	$\phi=90$
10	$t=75$	$\phi=20$	d	$\phi=95$		25	$\phi=100$	$h=200$	d	$t=140$
11	$t=80$	$\phi=10$	h	$\phi=90$		26	$\phi=100$	$h=180$	ϕ	$d=10$
12	$t=45$	$\phi=75$	h	$\phi=10$		27	$t^M=5$	$\phi=80$	d	$\phi=5$
13	$t=90$	$\phi=5$	h	$\phi=80$		28	$d=60$	$\phi=90$	h	$d=20$
14	$t=30$	$t^M=20$	h	$\phi=100$		29	$d=72$	$\phi=90$	h	$\phi=5$
15	$t=45$	$t^M=40$	h	$\phi=5$		30	$t=90$	$t^M=40$	h	$\phi=90$

Примітка: t , °C; ϕ , %; d , г/кг сп; h , кДж/кг сп.

Таблиця П2.13. Вихідні дані до задачі 7.45

Параметр	Варіант						
	а)	б)	в)	г)	д)	е)	ж)
X_A	$t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t^p = 12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t^m = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Y_A	$\varphi = 100\text{ \%}$	$\varphi = 60\text{ \%}$	$\varphi = 50\text{ \%}$	$t^m = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$	$h = 40\text{ кДж/кг}$	$t^m = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi = 80\text{ \%}$
Z_B	$\varphi = 5\text{ \%}$	$h = 140\text{ кДж/кг}$	$t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t^m = 26,3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t^m = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi = 10\text{ \%}$

Таблиця П2.14. Вихідні дані до задачі 7.46

Параметр	Варіант						
	а)	б)	в)	г)	д)	е)	ж)
X_A	$t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t^m = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t^m = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	$h = 220\text{ кДж/кг}$
Y_A	$h = 220\text{ кДж/кг}$	$d = 48\text{ г/кг}$	$\varphi = 5\text{ \%}$	$t^m = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi = 10\text{ \%}$	$d = 48\text{ г/кг}$	$\varphi = 30\text{ \%}$
Z_B	$t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi = 40\text{ \%}$	$\varepsilon = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\varphi = 50\text{ \%}$	$t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблиця П2.15. Вихідні дані до задачі 8.22

№	Азот		№	Повітря		№	Вуглекислий газ	
	p_1 , МПа	$p_{\text{нс}}$, МПа		p_1 , МПа	$p_{\text{нс}}$, МПа		p_1 , МПа	$p_{\text{нс}}$, МПа
1	0,5	0,05	10	1,0	0,1	19	1,0	0,1
2	0,5	0,1	11	0,5	0,1	20	0,75	0,15
3	0,5	0,15	12	0,3	0,1	21	0,65	0,2
4	0,5	0,2	13	0,25	0,1	22	0,75	0,3
5	0,5	0,25	14	0,2	0,1	23	0,8	0,4
6	0,5	0,3	15	0,16	0,1	24	2,0	1,2
7	0,5	0,35	16	0,14	0,1	25	2,0	1,4
8	0,5	0,4	17	0,12	0,1	26	0,75	0,6
9	0,5	0,45	18	0,11	0,1	27	1,0	0,9

Таблиця П2.16. Вихідні дані до задачі 8.23

№	p_1 , МПа	t_1 , °C	x_1	p_2 , МПа	№	p_1 , МПа	t_1 , °C	x_2	p_2 , МПа
1	8,0	400	1,0	5,0	14	1,0	300	0,92	0,1
2	6,0	400		0,1	15	1,8			1,2
3	1,5				16	1,6	300		0,1
4	0,6	200		0,4	17	0,2	250		0,05
5	1,0	300	0,8	0,6	18	0,15		0,95	0,1
6	1,0			0,6	19	0,3	300		0,18
7	1,2	250		0,7	20	1,2	350		0,8
8	3,0	350		0,1	21	0,5			0,3
9	0,6		0,9	0,1	22	2,0	350	0,90	0,8
10	0,6	350		0,4	23	0,6	300		0,12
11	1,0	300		0,2	24	1,2	300		0,6
12	1,6			0,1	25	1,2			0,6
13	2,4	450	0,98	0,8	26*	$x = 0,8$		1,0	0,004

Таблиця П2.17. Вихідні дані до задачі 8.24

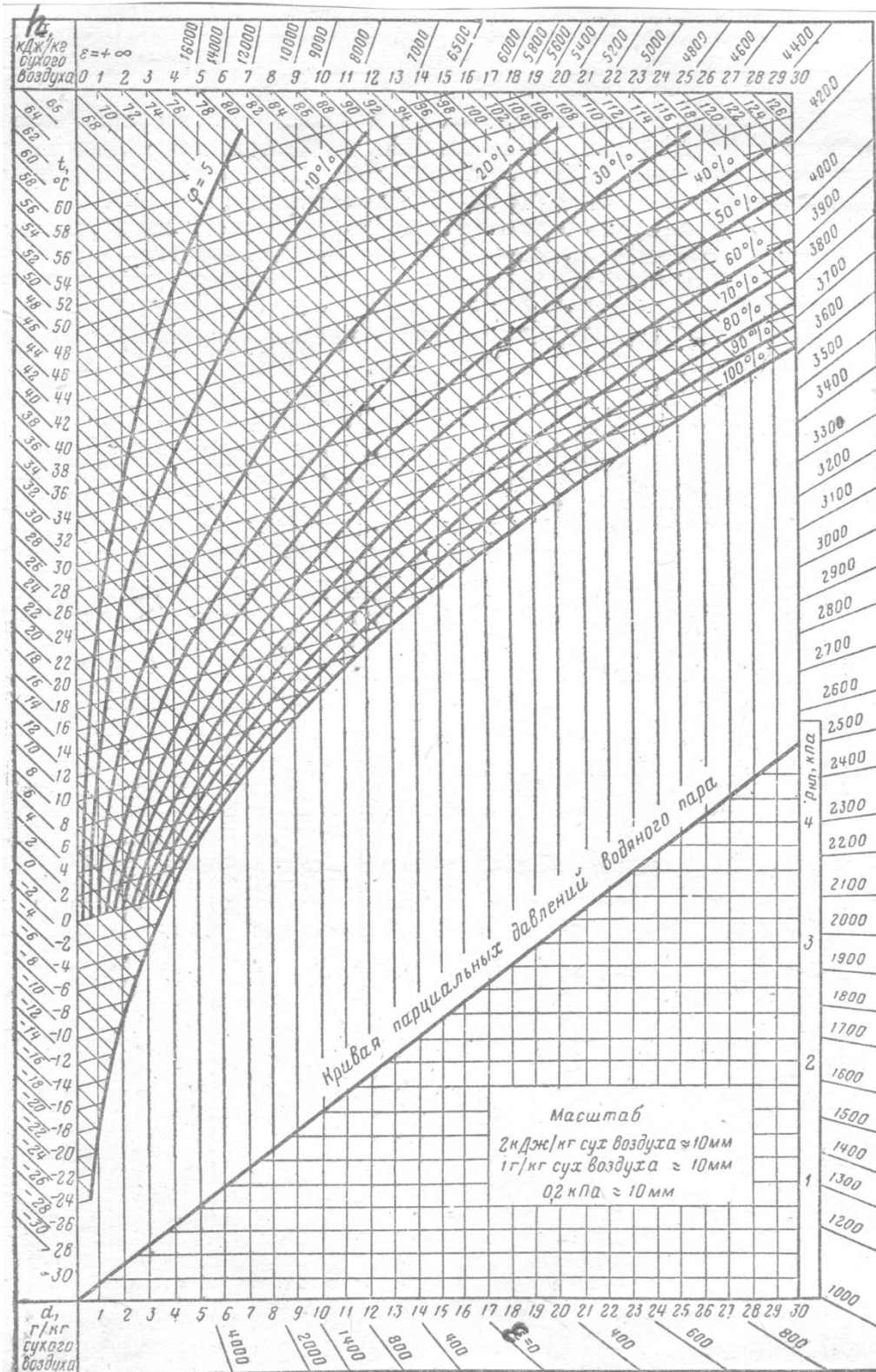
№	p_1 , МПа	t_1 , °C	p_2 , МПа	d_{\min} , мм	d_{\max} , мм	№	p_1 , МПа	t_1 , °C	p_2 , МПа	d_{\min} , мм	d_{\max} , мм
1	8,5	450	2,0	5	7	14	1,2	270	0,4	6	8
2	6,0	400	1,5	6	8	15	1,2	300	0,3	7	9
3	6,0	450	1,0	7	9	16	1,2	350	0,2	8	10
4	3,5	400	0,5	8	10	17	1,0	450	0,05	9	11
5	3,0	450	0,3	9	11	18	1,0	380	0,1	10	12
6	3,0	400	1,0	10	12	19	1,0	300	0,4	15	20
7	3,0	350	0,8	10	12	20	0,8	350	0,1	8	10
8	2,0	400	0,25	9	11	21	0,8	300	0,2	9	11
9	2,0	350	0,4	8	10	22	0,5	300	0,1	10	12
10	2,0	300	0,8	7	9	23	0,4	300	0,08	15	20
11	1,5	300	0,4	6	8	24	0,3	300	0,06	20	26
12	1,5	270	0,6	5	7	25	0,2	350	0,02	25	30
13	15	350	3	5	7	26	1	350	0,1	25	30

Таблиця П2.18. Вихідні дані до розрахункової роботи

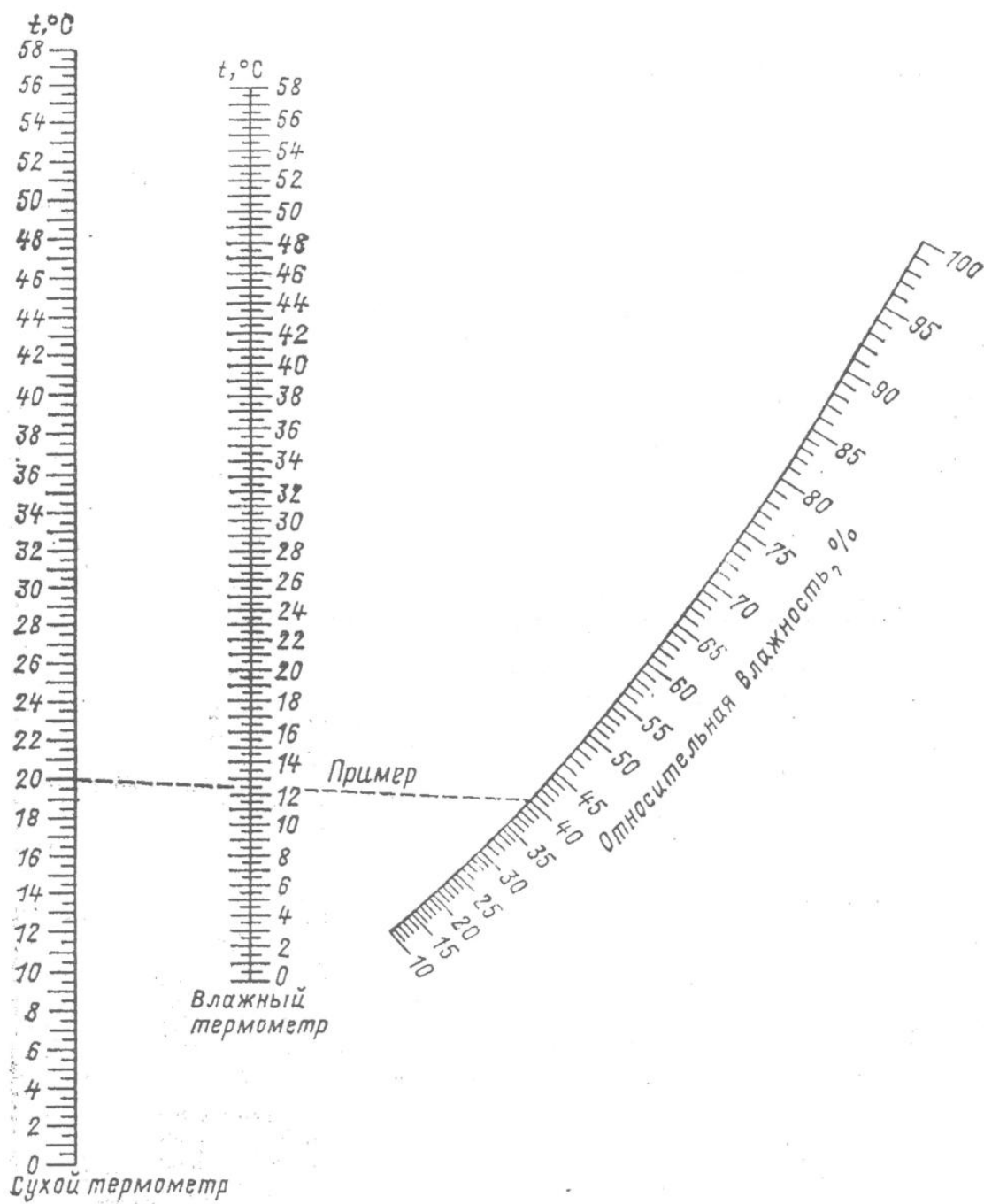
Ізобарний процес									
№	p_1 , МПа	t_1 , °C	V_1 , м ³	V_2 , м ³	№	p_1 , МПа	t_1 , °C	V_1 , м ³	V_2 , м ³
1	1,6	380	4,0	2,2	8	1,1	380	6,0	3,2
2	0,6	290	6,0	3,2	9	0,9	290	8,0	5,2
3	0,4	350	8,0	5,0	10	0,3	280	10	6,0
4	1,2	400	10	6,0	11	0,4	400	12	6,8
5	0,6	380	12	6,8	12	3,0	300	1,5	1,0
6	2,8	400	1,5	0,9	13	4,3	350	1,0	0,7
7	4,3	350	1,0	0,5	14	0,7	350	4,0	2,2
Ізохорний процес									
№	p_1 , МПа	t_1 , °C	V_1 , м ³	p_2 , МПа	№	p_1 , МПа	t_1 , °C	V_1 , м ³	p_2 , МПа
1	3,6	480	0,4	1,6	8	6,4	450	0,6	3,5
2	5,0	450	0,6	3,0	9	8,0	500	1,0	4,0
3	6,4	500	1,0	3,0	10	3,3	420	1,5	1,8
4	2,3	420	1,5	1,2	11	2,9	380	2,0	1,8
5	1,9	380	2,0	1,0	12	1,9	370	4,0	1,2
6	3,6	480	0,5	1,7	13	1,8	400	5,0	0,6
7	4,9	480	0,4	2,5	14	2,8	370	4,0	2,0
Ізотермічний процес									
№	p_1 , МПа	t_1 , °C	V_1 , м ³	V_2 , м ³	№	p_1 , МПа	t_1 , °C	V_1 , м ³	V_2 , м ³
1	3,0	260	1,2	0,6	7	2,3	240	1,2	0,6
2	1,8	220	2,0	1,2	8	3,3	270	1,8	0,8
3	2,3	240	2,5	1,3	9	1,3	250	2,0	0,5
4	4,0	260	3,0	2,0	10	1,7	220	2,5	1,3
5	2,1	300	5,0	0,8	11	2,3	230	3,5	2,0
6	1,7	270	8,0	1,6	12	1,7	280	5,0	0,8
Адіабатичний процес									
№	p_1 , МПа	t_1 , °C	V_1 , м ³	p_2 , МПа	№	p_1 , МПа	t_1 , °C	V_1 , м ³	p_2 , МПа
1	7,4	450	0,8	0,2	5	4,0	350	2,0	0,1
2	5,8	400	1,0	0,05	6	3,3	420	4,2	0,08
3	3,6	320	1,4	0,2	7	1,7	350	10,0	0,12
4	5,6	420	1,6	0,3	8	6,4	400	0,6	0,08

Додаток 3. Довідкові діаграми

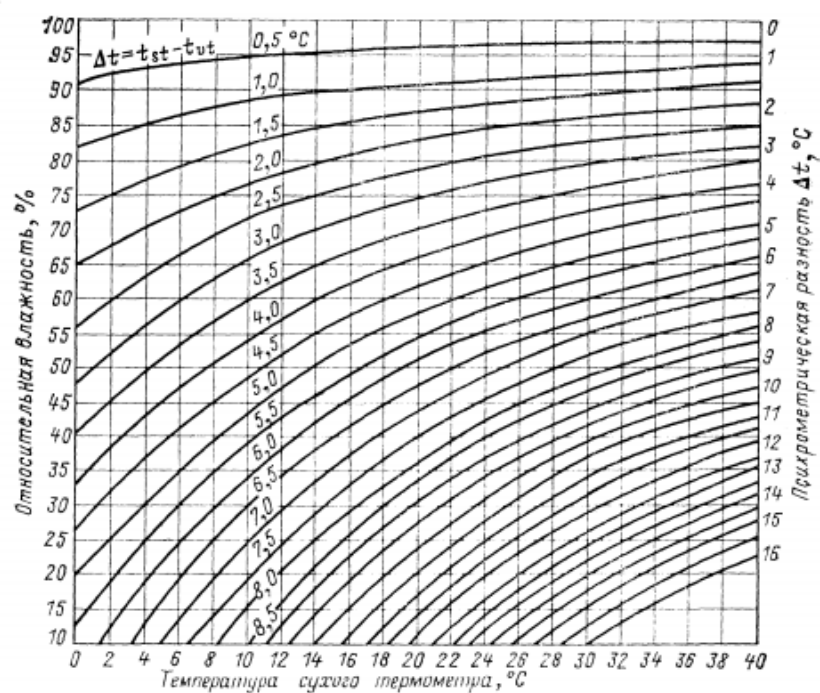
П 3.1. h, d – діаграма станів вологого повітря при $P=0,994$ МПа (745 мм рт.ст.)



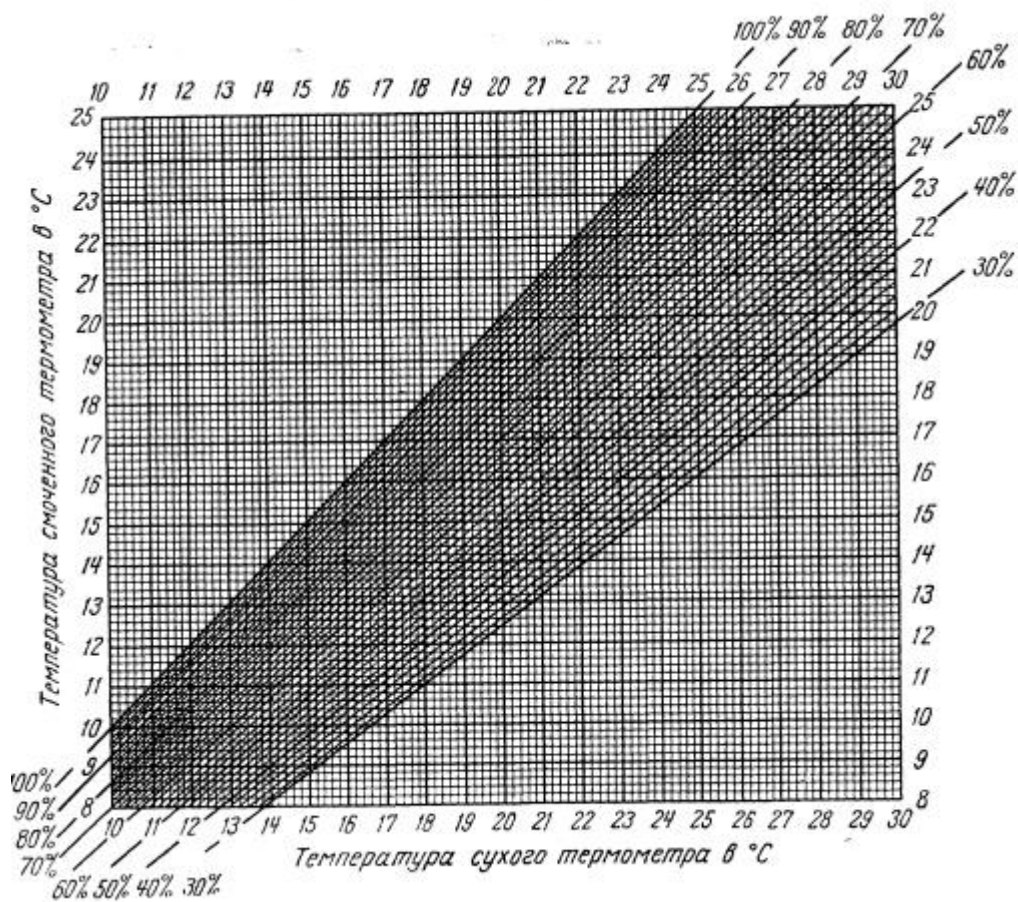
ПЗ.2. Номограма для визначення відносної вологості повітря за показаннями психрометра Ассмана [3.7]



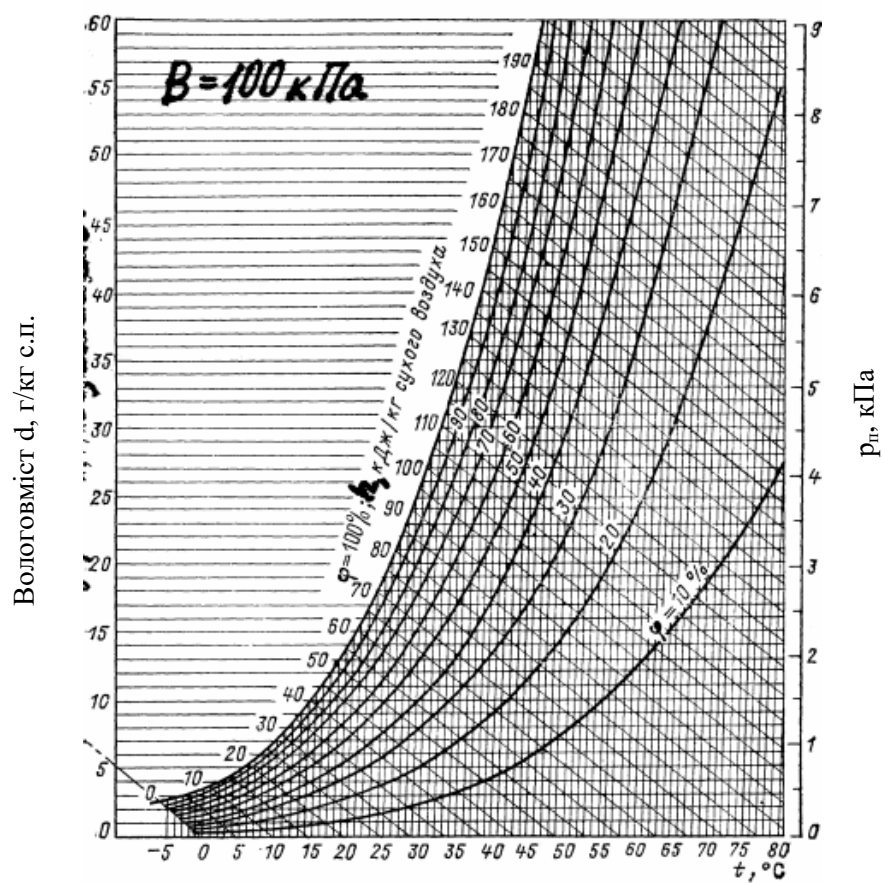
ПЗ.3. Номограма для визначення відносної вологості повітря за показаннями психрометра Ассмана [3.7]



ПЗ.4. Номограма для визначення відносної вологості повітря за показаннями психрометра Августа ($w = 0,2$ м/с)



ПЗ.5. Психрометрична діаграма d, t



Література

1. Основна (підручники і навчальні посібники)

- 1.1. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка: підручник / О.Ф.Буляндра. – К.: Техніка, 2001. – 319 с.
- 1.2. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й. Основи технічної термодинаміки. – Вінниця: «Поділля-2000». – 2004. – 352 с.
- 1.3. Константинов С.М., Панов Є.М. Теоретичні основи теплотехніки: Підручник. – К.: «Золоті Ворота», 2012. – 592 с.
- 1.4. Константинов С.М. Технічна термодинаміка: Підручник. /С.М.Константинов – К.: «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2001. – 368 с.
- 1.5. Константинов С.М. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну: Навч. посіб. / С.М.Константинов, Р.В.Луцик. – К.: Видавництво «Освіта України», 2009. – 543 с.
- 1.6. Чеботарьов В.О. Технічна термодинаміка: Навч. посіб. / В.О.Чеботарьов, А.Д.Беркута. – К.: Вища школа, 1969. – 204 с.

2. Довідкова

- 2.1. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ С.Л.Ривкин, А.А.Александров. – М.: Энергоиздат, 1984. – 80 с., ил.
- 2.2. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
- 2.3. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 400 с.
- 2.4. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов: Справочник. Изд. 4-е. / С.Л.Ривкин. – М.: Энергоиздат, 1987. – 288 с.
- 2.5. Тамарин М.Д. Диаграммы $i-s$ и $I-d$ и их применение для теплотехнических расчетов. / М.Д.Тамарин, Б.Д.Симаков, В.П.Головко. – Харьков: Изд. ХГУ, 1970. – 100 с.
- 2.6. Александров А.А. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара: Справочник. / А.А. Александров, Б.А.Григорьев. Рек. Гос. Службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 168 с.
- 2.7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР В.А.Григорьева, В.М.Зорина. – 2-е изд. перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.: ил.

3. Додаткова

- 3.1. *Вукалович М.П.* Техническая термодинамика: Учебник / М.П.Вукалович, И.И.Новиков. – М.: Машиностроение, 1972. – 496 с.
- 3.2. *Кириллин В.А.* Техническая термодинамика: Учебник / В.А.Кириллин, В.В.Сычев, А.Е.Шейндлин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
- 3.3. *Андрианова Т.Н.* Сборник задач по технической термодинамике / Т.Н.Андрианова, Б.Д.Дзампов, В.Н.Зубарев, С.А.Ремизов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 264 с.
- 3.4. *Андрианова Т.Н.* Сборник задач по технической термодинамике: Учеб. пособие / Т.Н.Андрианова, Б.Д.Дзампов, В.Н.Зубарев, С.А.Ремизов, Н.Я.Филатов – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 356 с.: ил.
- 3.5. *Рабинович О.М.* Сборник задач по технической термодинамике / О.М.Рабинович. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
- 3.6. *Серова Ф.Г.* Сборник задач по термодинамике / Ф.Г.Серова, А.А.Янкина. – М.: Просвещение, 1976. – 160 с.
- 3.7. *Воронец Д.* Влажный воздух: термодинамические свойства и применение: Пер. с сербохорв. / Д.Воронец, Д.Козич. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с., ил.
- 3.8. *Бер Г.Д.* Техническая термодинамика. Теоретические основы и технические приложения / Г.Д.Бер. – М.: Мир, 1977. – 518 с.: ил.